

ISSN 0386—5878

土木研究所資料 第2424号

012

土木研究所資料

ロックフィルダムの地震時表層すべりに関する 振動実験報告

昭和62年1月

建設省土木研究所
フィルダム研究室

Copyright ©1987 by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ロックフィルダムの地震時表層すべりに関する 振動実験報告

フィルダム研究室 豊 田 光 雄

〃 志 賀 三 智

〃 松 本 徳 久

要旨

本報告は、材料の最大粒径および粒度等がロックフィルダムの地震時表層すべりに与える影響を室内実験により解明しようとしたものである。

実験はロックフィルダム堤体全部をモデル化するのではなく、堤体表層の一部を切り出した要素モデルとして4×4mの振動台を用いて行った。

この結果、表層すべり加速度と最大粒径との相関は強く、均等係数の大小は破壊形態に影響すること、周波数依存性は加振時間が一定であれば表層すべり加速度に影響しないことなどがわかった。

キーワード：地震時表層すべり，ロック材料，振動実験

目 次

1. はじめに	1
2. フィルダム堤体の振動破壊に関するこれまでの研究	2
3. 要素モデル寸法に関する予備試験	6
4. 実験方法	10
4.1 実験ケース	10
4.2 実験材料	11
4.3 要素モデルの作製方法	11
4.4 加振および計測	14
5. 実験結果および考察	18
5.1 材料の最大粒径の効果	18
5.2 材料の粒度分布の影響	23
5.3 堤体密度の差の影響	36
5.4 加振周波数の影響	39
5.5 加振継続時間の影響	43
5.6 湛水の有無	46
6. ま と め	51
7. 参考文献	52
8. 参考資料	53

1. は じ め に

わが国は世界で有数の地震国であり、地震時におけるロックフィルダムの安全性を確保することは重要な課題である。本報文は、材料の最大粒径および粒度等がロックフィルダムの地震時表層すべりに与える影響を室内実験により解明しようとしたものである。

筆者らは以前ロックフィルダムの実ダム材料（最大粒径19.1mm）による模型振動実験¹⁾を行い、①模型は入力加速度が増すにつれて固有振動数が減少し減衰定数が増えるという非線形特性を示すこと、②模型は正弦波および地震波加振によってせん断振動を示すこと、③模型の破壊は、最初に堤体の不安定な粒子が転げ落ち、次に斜面表層が薄くなだれ状にすべるという表層すべりの現象が特徴的であること等を確認した。

本報文は、このなかでロックフィルダム堤体の表層すべりに着目し、それに影響する要因について検討したものである。影響する要因としては、④堤体材料の最大粒径、粒子形状および粒度分布、⑤堤体の密度、⑥堤体の法勾配、⑦湛水の有無、さらには⑧地震動の特性（最大加速度、周波数、振動継続時間）があげられる。

これまでに堤体の破壊に関して材料の最大粒径、地震動の大きさ等の影響について数多くの研究が行なわれている。²⁻¹¹⁾例えば、最大粒径と堤体の破壊加速度との研究によれば、破壊基準が定量的でないものもあるが、粒径の大きいもので作られた模型は、破壊加速度が大きくなり振動に強いということが報告されている。しかし、既往の三軸圧縮試験¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾結果によれば、最大粒径が大きくなると内部摩擦角は小さくなる傾向にあり、これから破壊加速度を計算で求めると、粒径の小さい方が破壊加速度は大きくなる。すなわち、粒径の大きさによって実験結果と計算結果では異なった結論となる。本報文は、このような点の解明を試みたものである。

実験はロックフィルダム堤体全部をモデル化するのではなく、堤体表層の一部を切り出した要素モデルとした。その理由は、全体モデルでは、破壊についての相似律が成り立ち難いことおよび表層すべりに着目しているので部分の抽出要素モデルによる試験が可能と考えたからである。すなわち、振動台上に表層要素モデルを製作し、正弦波加振によって表層すべりを起こすときの加速度と表層すべりに影響する因子（先に述べた④、⑤、⑦、⑧）との関係について調べた。また、堤体表層付近の摩擦抵抗を調べるために、静的安息角の測定および低側圧による三軸圧縮試験を行った。

2. フィルダム堤体の振動破壊に関するこれまでの研究

① 破壊現象

模型振動実験によれば、フィルダムの破壊は図-2.1¹⁾に示すように、はじめにロック部の不安定な粒子が転げ落ち、次に堤体法面表層が薄くすべり出し、コア部とロックフィル部が分離し、最後にコア部が破壊する現象を示す。

② フィル材料の最大粒径に関して

フィル材料の最大粒径が大きくなれば、破壊加速度は大きくなる(図-2.2²⁾, 図-2.3³⁾。

③ 粒度に関して

図-2.4に示すように振動台上に作製した模型に加振を行い、動的安息角を測定すると、表-2.1⁴⁾に示すように、単一粒径の動的安息角は、 $U_c=3$ の動的安息角に比べ大きい。

④ 間隙比に関して

堤体の間隙比が小さくなれば、破壊加速度は大きくなる(図-2.5⁵⁾)。

⑤ 堤体の法勾配に関して

堤体の法勾配を緩くすれば、破壊加速度は大きくなるが、破壊加速度は直線的に増加していない(図-2.6⁶⁾, 図-2.7⁷⁾)。

⑥ 湛水の有無に関して

湛水時の破壊加速度は、空虚時に比べ小さい(図-2.7⁷⁾)。

⑦ 入力地震動に関して

周波数の影響については次の3つに結論がわかる。

a) 周波数が低いほど小さな加速度で破壊する(図-2.8⁸⁾)。

b) すべり開始時の加速度は周波数に依存しない(図-2.9⁹⁾)。

c) 周波数が高くなると破壊加速度(なだれ状の崩壊を起すときの加速度)は小さくなる(表-2.2¹⁰⁾)。

⑧ 小段の有無に関して

小段があれば堤体法面の全面的な破壊は生じない(図-2.10¹¹⁾)。

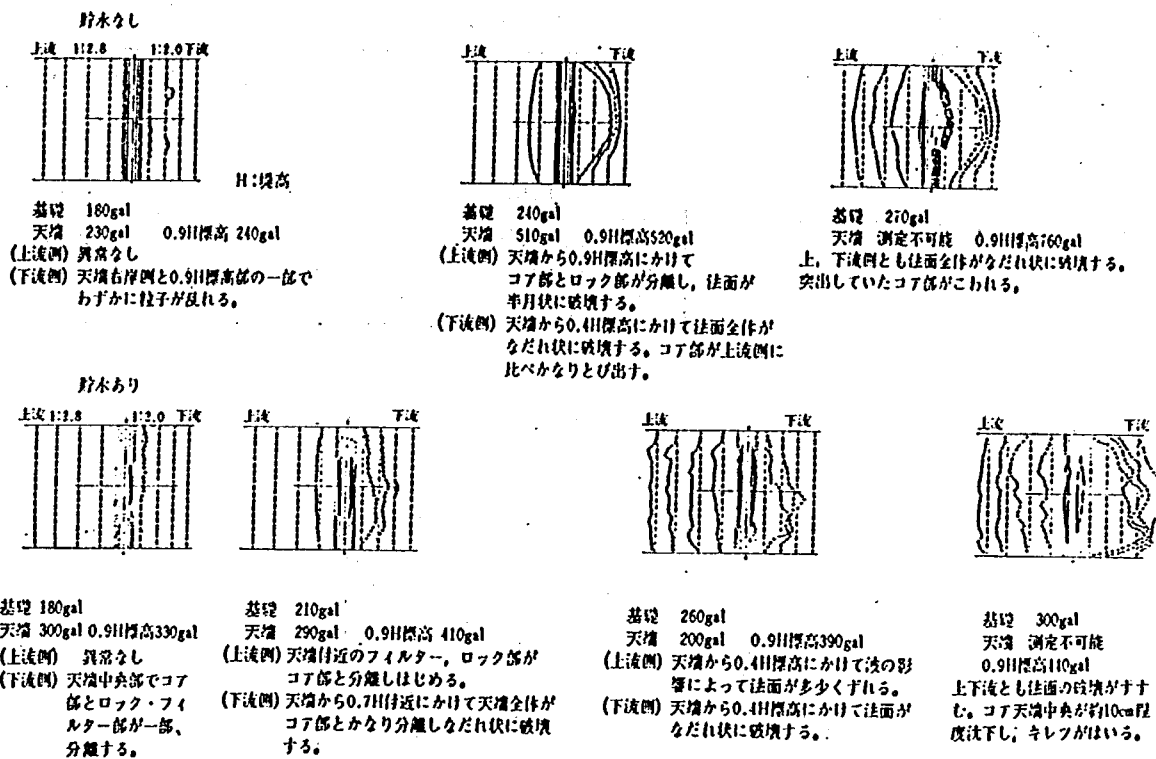


図 - 2. 1 正弦波加振による堤体の破壊現象 (周波数 5 Hz で 8 秒間加速 CASE 8)¹⁾

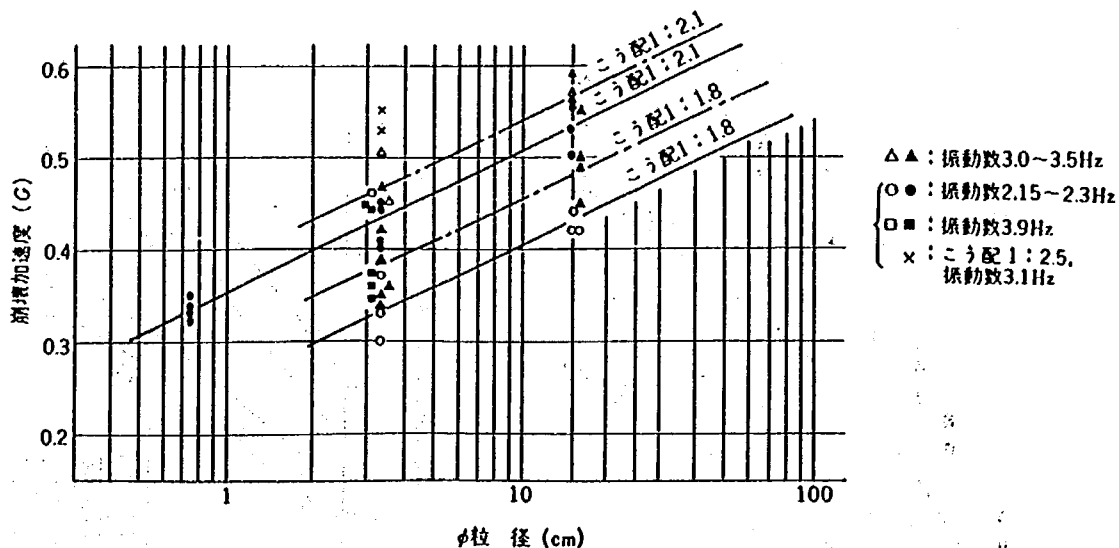


図 - 2. 2 崩壊加速度と粒径との関係²⁾

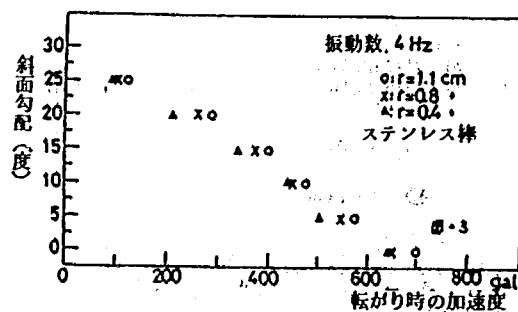


図 - 2. 3 低拘束時におけるロック材³⁾のせん断強度

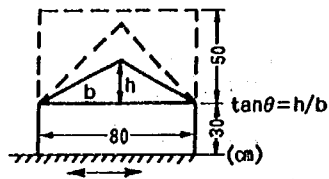


図-2.4 静的安息角で⁴⁾できた山

表-2.1 動的安息角の比較⁴⁾

材 料		150gal	400gal
均 一 粒 径 (30 mm)	緩	$\theta^\circ = 45.9^\circ$	34.7°
	密	49.8°	38.2°
ロック材 (硬質砂岩) 最大粒径 15 mm $U_c = 3$	緩	40.5°	26.0°
	密	45.1°	30.6°

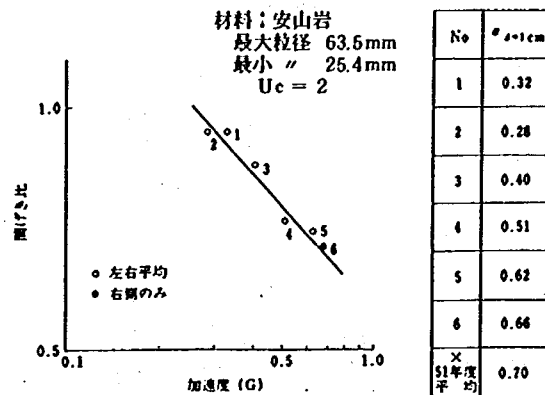


図-2.5 間隙比と加速度との関係⁵⁾

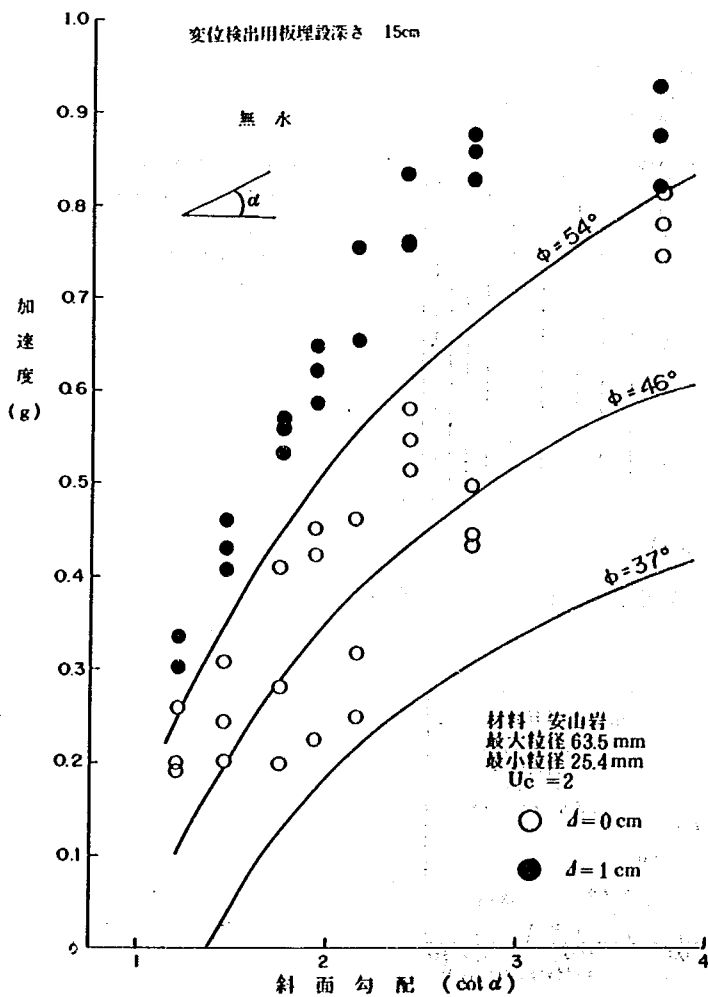


図-2.6 法勾配と加速度⁶⁾

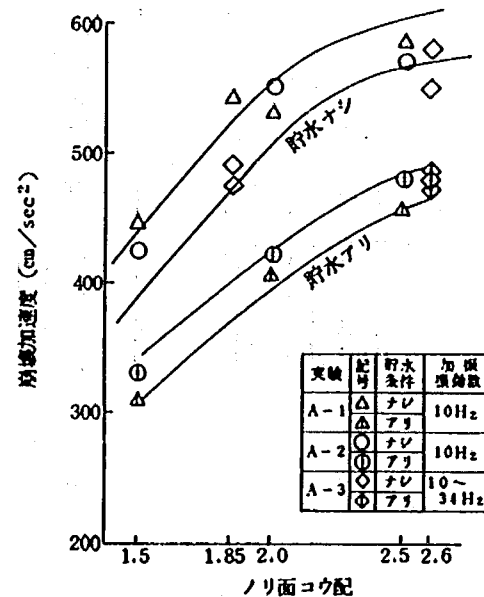


図-2.7 法面勾配と崩壊加速度⁷⁾

材料 碎石 最大粒径 10 mm
最小粒径 5 mm

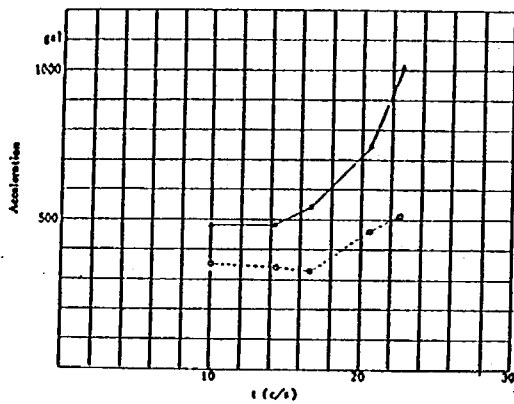


図 - 2.8 斜面の崩壊加速度と 8) 振動数との関係

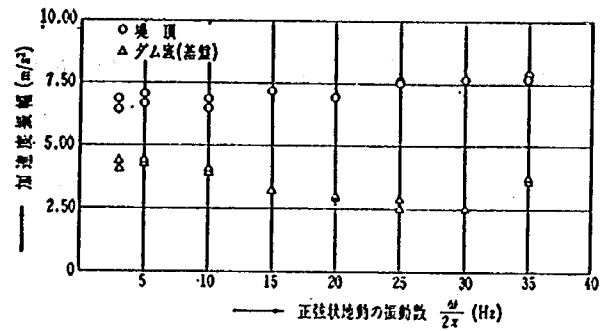


図 - 2.9 表層すべり発生時の堤頂と 9) ダム底の加速度振幅

表 2.2 周波数と破壊加速度¹⁰⁾

振動台の振動周期	ダム斜面になだれがおきた時の振動台の加速度
0.46 秒 (2.17 Hz)	0.35 g
0.25 ~ 0.29 (4 ~ 3.45 Hz)	0.27 g
0.22 ~ 0.23 (4.5 Hz ~ 4.35 Hz)	0.20 g

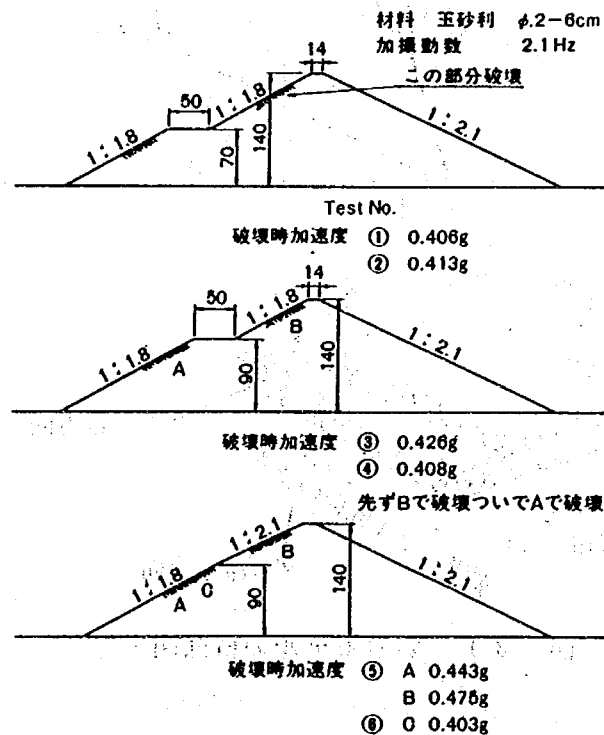


図 - 2.10 法面形状と崩壊加速度¹¹⁾

3. 要素モデル寸法に関する予備試験

既往の実験結果および粘着力をゼロとした地震時の安定計算によると、地震動を受けたときのロックフィルダム破壊モードのひとつは表層の薄い厚さのすべりである。この破壊モードについては、堤体表層の一部を切り取った要素モデルによる実験が可能であろう。要素モデル実験は、堤体全体の縮小モデルに比べ次の利点がある。

- 1) 縮小全体モデルを作るわけでないので相似律を考慮しなくてもよく、破壊について定量的な推論が行い易い。
- 2) 要素モデルは、縮小全体モデルに比べ材料の所要量が少なく、製作が容易である。
- 3) 縮小全体モデル実験に比べ、実ダム材料に近い材料まで実験に用いることができる。

ただし、要素モデルの底面や側面は、実際のダムの状態を再現することは不可能であるから、表層すべりの完全な要素モデルというのもあり得ない。そこで、要素モデルの寸法が結果に与える影響を検討することとした。

図-3.1に示すように、要素モデルの厚さ、幅、傾きをそれぞれ変えて検討することにした。実験は、粒径100-50.8 mmの材料を用い表-3.1、図-3.2に示す要素モデルを作製し5 Hz、4秒間の正弦波加振を行った。土槽底面には使用材料を石膏ではりつけた。要素モデルに4秒間の正弦波加振を行うとある一定以上の加速度以上から表層がすべり、相対変位が生じるがこの量を測定した。

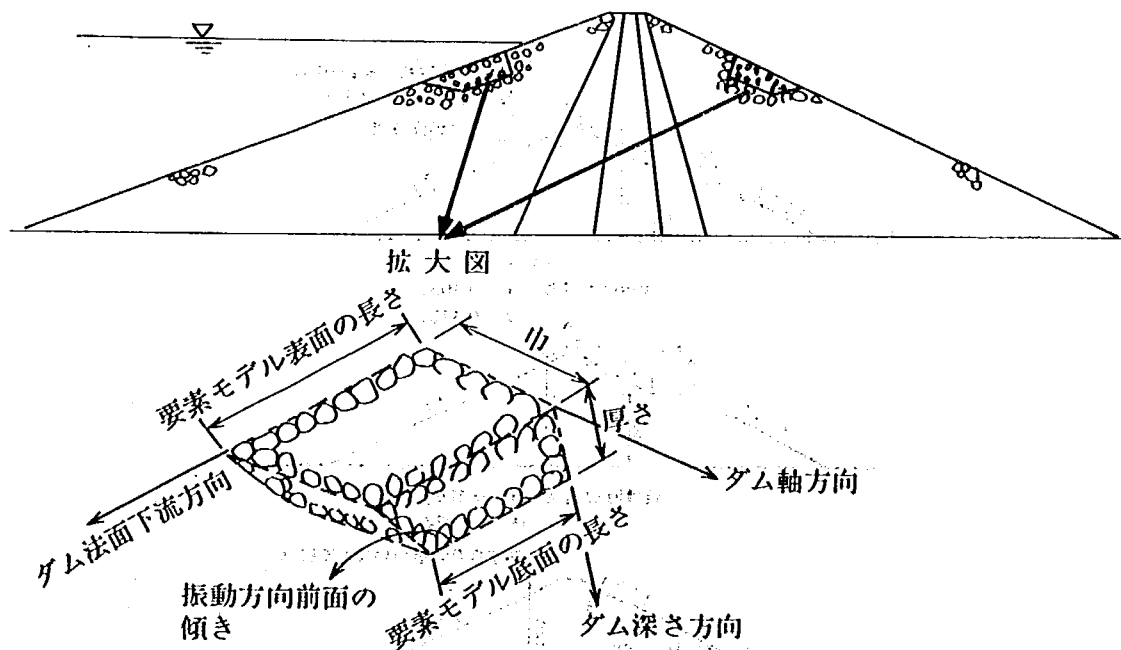


図-3.1 要素モデルの概念図

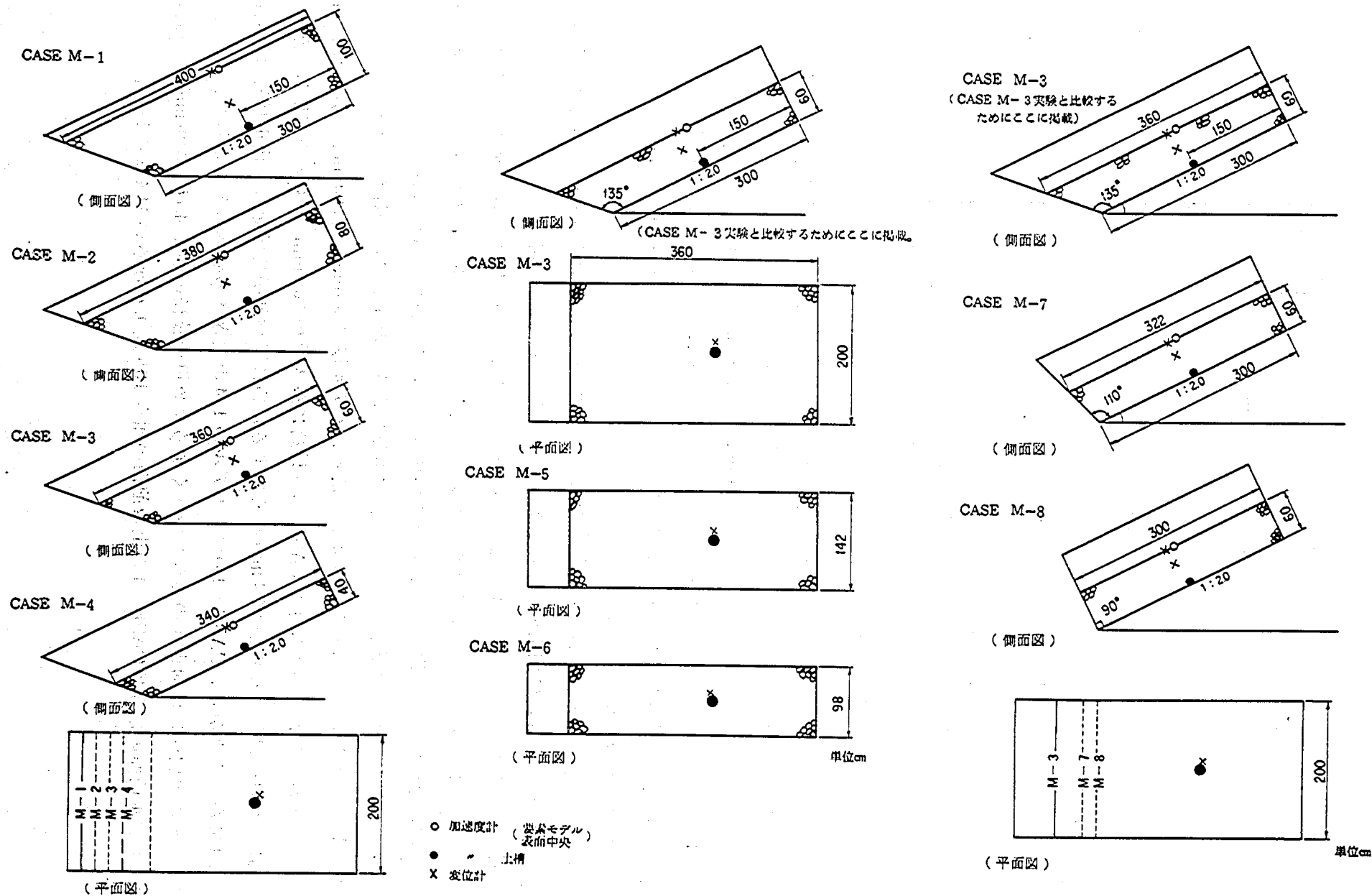


図 - 3. 2 要素モデル大きさ

表-3.1 要素モデルの検討

ケ - ス	要素モデル の厚さ (cm)	要素モデル の巾 (cm)	要素モデル 前面の傾き (度)
M - 1	100	200	135°
M - 2	80		
M - 3	60		
M - 4	40		
M - 5	60	100	135°
M - 6		140	
M - 7	60	200	90°
M - 8			110°

{土槽勾配 1 : 2.0}
{水無し}

図-3.3に要素モデルの厚さ，幅，前面の傾きと相対変位5，10，15mmの要素モデル表面および底面の表層すべり加速度を示す。これより次のことが言える。

- 1) 要素モデルの厚さについては，厚さを40cmから100cmまで変えて実験した。要素モデル厚さが厚くなるにつれて所定の相対変位量（5，10，15mm）を生じさせる表層すべり加速度は，底面においては減少しているが表面においては，特に相対変位量が10，15mmとやや大きい場合，60cm～100cmの厚さでは余り変っていない。
- 2) 要素モデルの幅の影響は，幅が広くなるにつれてモデル表面および底面の加速度は小さくなり，幅が狭いときには側面の拘束の影響が大きいことを示している。
- 3) 傾きは，傾斜角度を変えても要素モデル表面および底面の表層すべり加速度は同じ大きさである。これは，要素モデル長さが要素モデル表面上においても3.6m（厚さの6倍）と非常に長く前面の傾斜による拘束の影響が打ち消されたのではないかと考えられる。

以上の結果を踏まえ，①要素モデル厚さは要素厚に左右されず，ほぼ一様な加速度が生じること，②側面拘束の少ない幅であることの2点を踏まえ，モデル厚さ60cm，幅200cm，前面の傾斜135°の要素モデルとした。あとに示すCASE-1は材料に最大粒径100mmのものを使用した，CASE-2以降は最大粒径が25.4mmを使用するために実験効率を考慮し，使用材料の最大粒径が1/4であることから，CASE-1の要素モデルの1/4の大きさの要素モデルとした。このために要素モデルの側面には拘束圧の影響を少なくするため単一粒径の砂（4.76-2.00mm）を入れ，要素モデル前面の傾きはCASE-1の土槽前面の傾き135度よりゆるい154度にした。

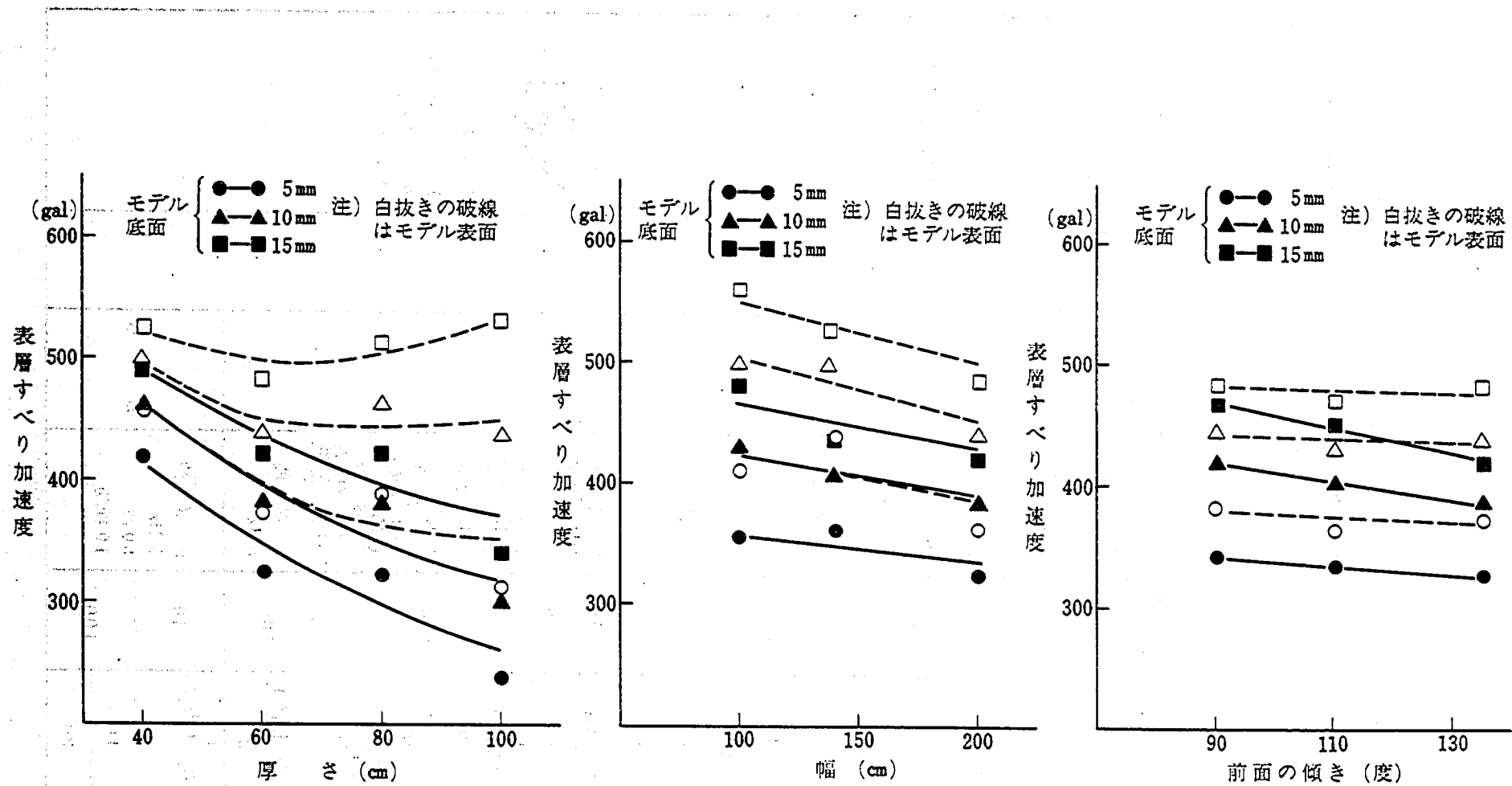


図-3.3 要素モデルの厚さ, 巾, 前面の傾きと表層すべり加速度との関係

4. 実験方法

4.1 実験ケース

実験は、表-4.1に示す6ケースを行った。CASE 1は最大粒径の影響、CASE 2は粒度分布の影響、CASE 3は堤体密度の差の影響、CASE 4は加振周波数の影響、CASE 5は加振継続時間の影響、CASE 6は湛水の有無について検討するものである。要素モデルの大きさを図-4.1に示す。

表-4.1 実験ケース

ケース	最大粒径 mm	均等係数	相対密度 %	加振条件	湛水の有無	法勾配	備考						
CASE 1 最大粒径の 影響	100	1 (単一粒径)	—	正 弦 波 5 Hz 50 秒 10 秒間			土槽の大きさ 420 cm 120 cm 300 cm 135° 材料：実ダム材料 と碎石						
	38.1												
	19.1												
	4.76												
	2.00												
CASE 2 粒度分布の 影響		1 (単一粒径)	100	正 弦 波 5 Hz 50 波 10 秒間									
		2											
		4											
		10											
		20											
		48											
CASE 3 堤体密度の 差	25.4	1 (単一粒径)	40	正 弦 波 5 Hz 50 波 10 秒間	空 虚	2 割	土槽の大きさ 95 cm 20 cm 55 cm 154° 側面拘束を少なく するために側面に 単一砂を入れる。 材料：碎石						
20		80											
CASE 4 加振周波数 の影響		1 (単一粒径)	100	正 弦 波 3 Hz 30 波									
		10		正 弦 波 5 Hz 50 波									
				正 弦 波 7 Hz 70 波									
		20		正 弦 波 10 Hz 100 波									
				正 弦 波 10 Hz 50 波									
CASE 5 加振継続時 間の影響		1 (単一粒径)	100	正 弦 波 2 Hz 200 波									
20		正 弦 波 2 Hz 50 波											
CASE 6 湛水の有無		1 (単一粒径)	40	正 弦 波 5 Hz 50 波				湛 水					
		4											
		10	100	10 秒間									
		20											

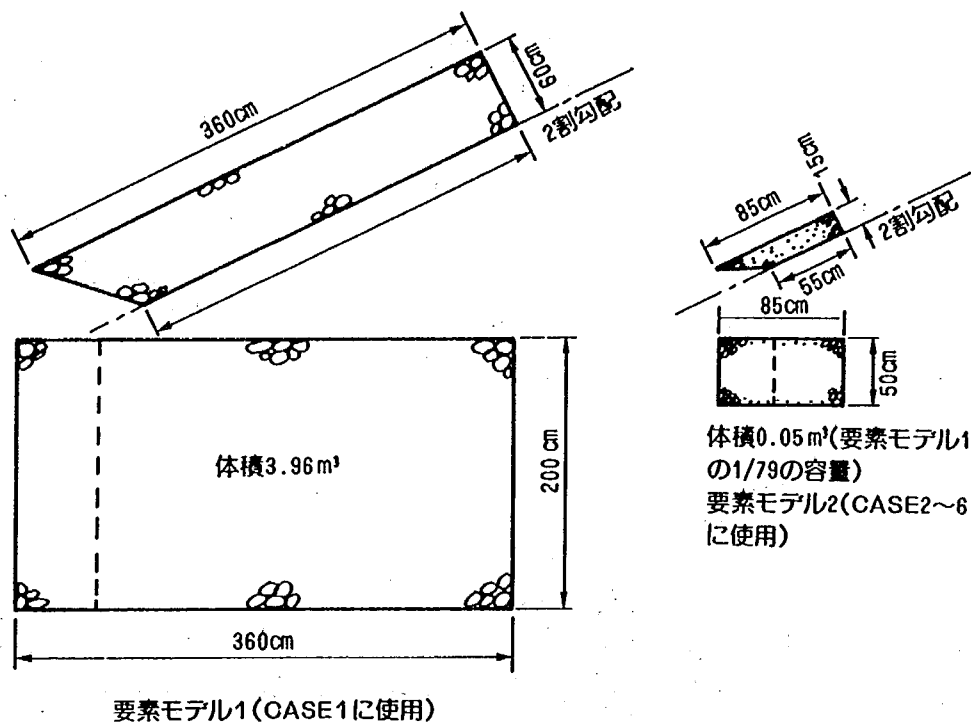


図 - 4.1 要素モデルの大きさ

4.2 実験材料

実験には表 - 4.2 に示す碎石および実ダム材料を用いた。碎石は絶乾比重 2.65，吸水量 0.4 % の硬質砂岩であり，実ダム材料は絶乾比重 2.68，吸水量 1.8 % の粗粒玄武岩である。いずれも堅硬な岩であり，締固めた時に破碎の少ないものを用いることにした。天日乾燥して用いたので碎石および実ダム材料の含水量はそれぞれ 0.12 %，1.2 % であった。

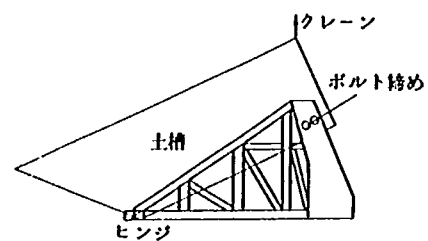
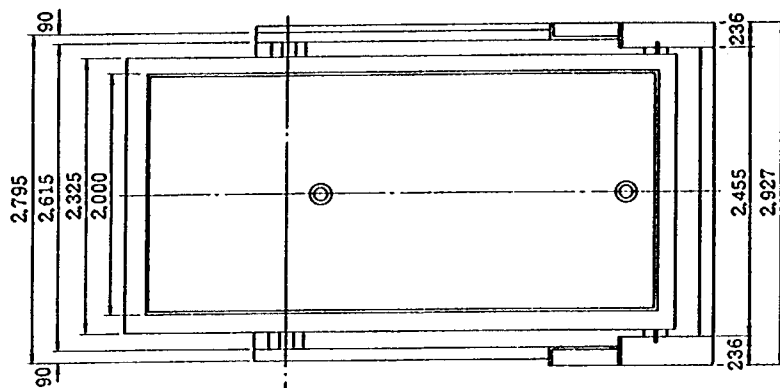
表 - 4.2 実験材料

呼 び 名	碎 石	実 ダ ム 材 料
岩 質	硬 質 砂 岩	粗 粒 玄 武 岩
絶 乾 比 重	2.65	2.68
吸 水 量	0.4 %	1.8 %

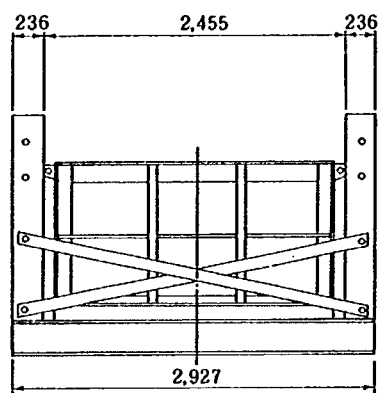
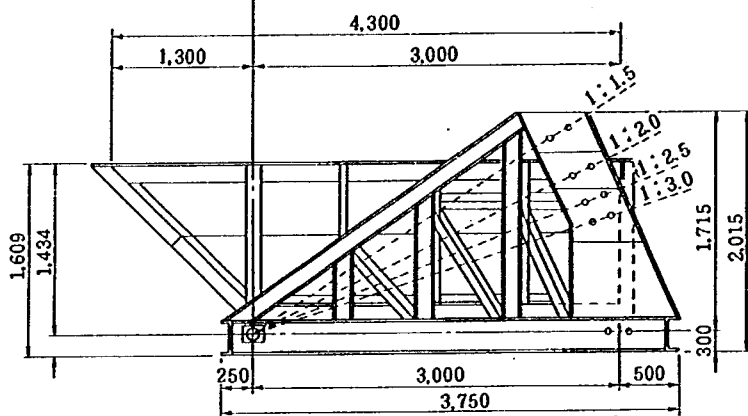
4.3 要素モデルの作製方法

要素モデルは，基本的には全てのケースで土槽に材料を投入し，バンドパイププレートによって締固めて作製した。CASE1 の要素モデルの作製に使用した土槽を図 - 4.2 に示し，図 - 4.3 にはCASE2~6までの要素モデル作製に使用した土槽を示す。なお，要素モデル周辺の境界は凹凸の形状にする必要があるために，CASE1 では土槽底面に石膏を塗ったうえに石をはりつけ，CASE2~6 では土槽底面に断面が 1 cm × 1 cm の角棒を 2 ケ所はりつけた。

次に，CASE2~6までの要素モデル作製手順を示す（写真 - 4.1）

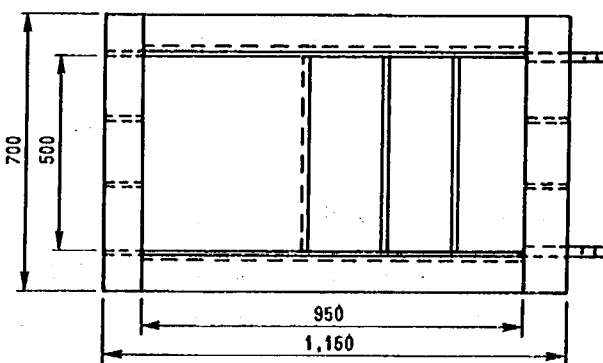
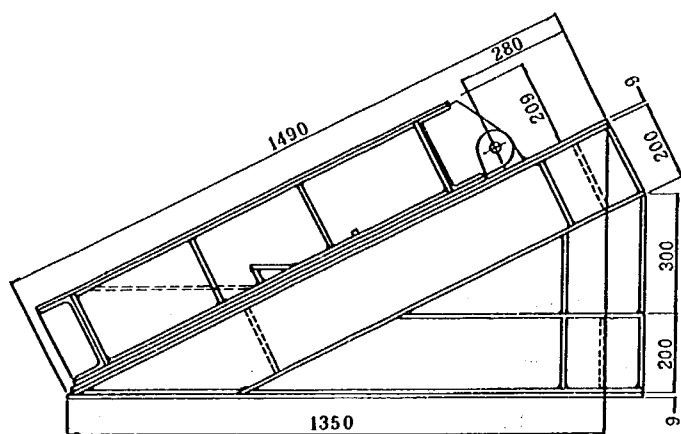


(架台付き土槽の概略図)



単位 mm

図 - 4.2 CASE 1 に使用する土槽



単位 mm

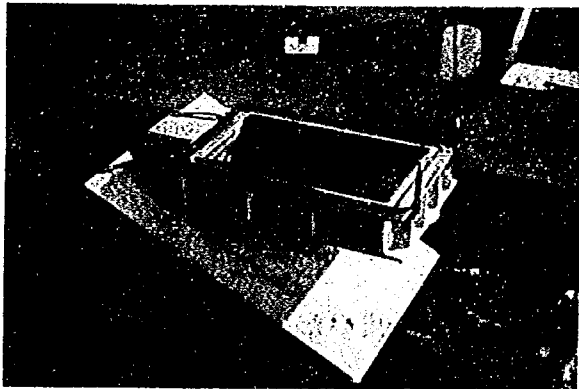
図 - 4.3 CASE 2~6 に使用する土槽



1) 試料調整



5) 要素厚さ(高さ)の読み取り



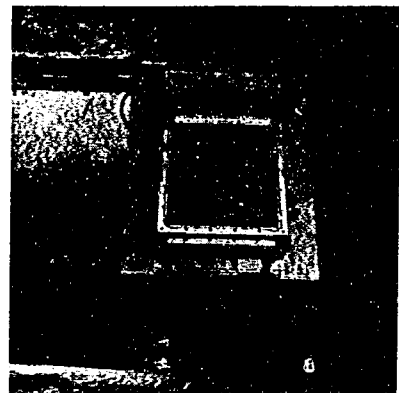
2) 土槽を水平にし型枠をセット



6) 変位計の受板の埋設



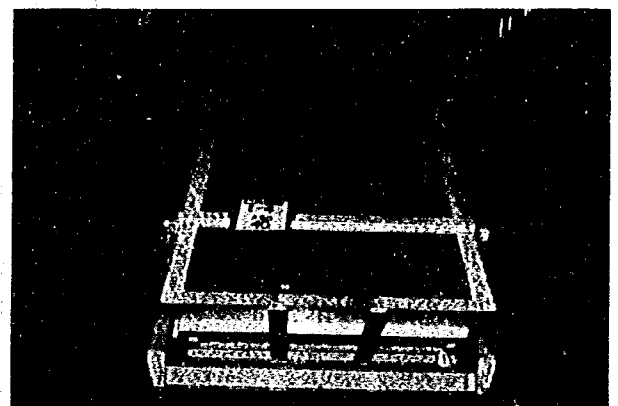
3) 材料の投入



7) 振動台の上にセットした要素モデル
(CASE 2~6)



4) ハンドパイププレートによる締固め



8) 要素モデル(CASE 1)

写真-4.1 要素モデルの作製手順

写真-4.2 CASE 1の要素モデルのでき上り状態

- ① 材料を所定の均等係数，所定の相対密度にするため各粒径毎に計量する。
- ② 計量した材料を混合し粒度調整する。
- ③ 土槽を水平状態にして，材料を土槽に投入する。なお，要素モデル側面の拘束の影響を少なくするために，単一粒径の碎石を投入するために型枠を側面にセットする。
- ④ 材料投入後，側面の型枠内に 4.76～2.00 mm の粒径の碎石を投入する。
- ⑤ ハンドバイブレータで所定の相対密度になるように締固める。
- ⑥ 定規でモデル高さともモデル幅を測定し，投入重量とその体積から密度を求める。
- ⑦ 型枠を取りはずした後，変位計がセットされているカラーを取りつける。変位計用の受板を埋めるために一部分を掘り，受板を埋めたあとハンドバイブレータで締める。
- ⑧ 要素モデル作製の土槽と振動台上にセットされている 2 割勾配の架台とをボルトで結合する。

ちなみに，写真－4.2 にCASE－1 の要素モデルのできあがり状態を示す。

4.4 加振および計測

要素モデルを加振するために表－4.3 に示す仕様の振動台を用いた。振動台は，振動台，油圧供給装置，制御装置，データ計測装置，コンピュータシステムより構成されている。振動台は，テーブルが 4 m×4 m で，油圧アクチュエータによって正弦波および地震波を用いて最大加速度 1 G まで水平単独，鉛直単独および水平と鉛直を用時に最大載荷重量 40 トンまで加振が可能である。

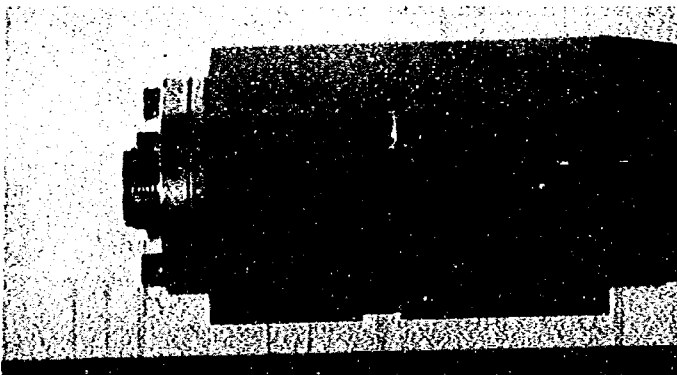
表－4.3 振動台の仕様

振動台	鋼床版溶接箱構造 大きさ：4.0 m×4.0 m 重さ：13.5 ton
最大積載重量	40 ton
最大変位	水平：±100 mm 鉛直：±50 mm
最大加速度	水平：±1 G 鉛直：±1 G
加振機	水平：29.5 ton アクチュエーター 2 台 鉛直：27.3 ton アクチュエーター 4 台
加振方向	水平および鉛直一軸，水平，鉛直の 2 軸加振可能
加振波形	正弦波および地震波
振動数範囲	起振可能周波数 100 Hz P S D 制御可能周波数範囲 水平：0.1～20 Hz 鉛直：0.1～50 Hz 正弦波制御可能周波数範囲 水平：0.1～35 Hz 鉛直：0.1～50 Hz

要素モデルの加速度測定にはサーボ型加速度計を，相対変位の測定には差動トランス型変位計を用いた。センサーの写真および仕様を写真－4.3と表－4.4に示す。ただし，CASE 6の実験では防水型の差動トランス型変位計を使用した。

これらのセンサーは，図－4.4に示すように，CASE 1では加速度計は要素モデル底面と表面に置き，差動トランス型変位計は要素モデル表面およびモデル中の相対変位を測定するために受板と二重管式の伝達棒を介し土槽の外側に設置した。一方，CASE 2～6では加速度計は土槽に設置し，相対変位は要素モデル表面だけで測定した。

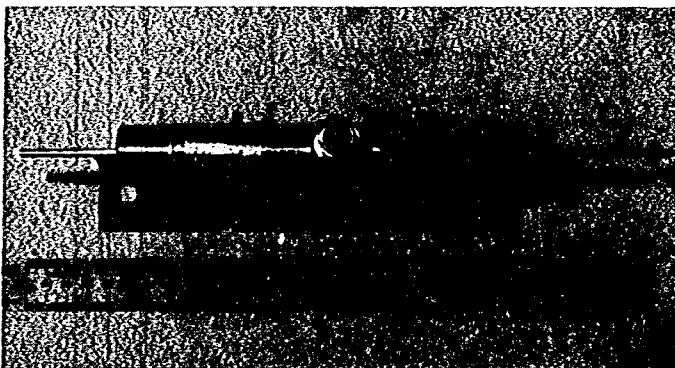
正弦波を用いて図－4.5に示すパターンで振動台の加振目盛（加速度振巾）を増やしていき加振中の加速度および相対変位量を計測した。図－4.6に計測ブロック図を示す。ローパスフィルタは加振周波数に応じて変え加振周波数の3倍程度の周波数とした。



a) サーボ型加速度計

表－4.4.a サーボ型加速度計

型 式	ASQ- 5AL (共和電業製)
容 量	$\pm 5 \text{ G}$
応 答 周 波 数	DC- 590 Hz
出 力 電 圧	$\pm 5 \text{ V}$
非 直 線 型	0.03%FS
大きさ(寸法, 重量)	46×46×109 mm •530g



b) 差動トランス型変位計

表－4.4.b 差動トランス型変位計

型 式	LD- 501 (坂田電機製)
容 量	$\pm 25 \text{ mm}$
応 答 周 波 数	DC- 30 Hz
出 力 電 圧	$\pm 2 \text{ V}$
非 直 線 型	0.5 %Fs
大きさ(寸法, 重量)	30×193 mm

注) 防水型差動トランス型変位計も仕様は同じ

写真－4.3 センサーの写真

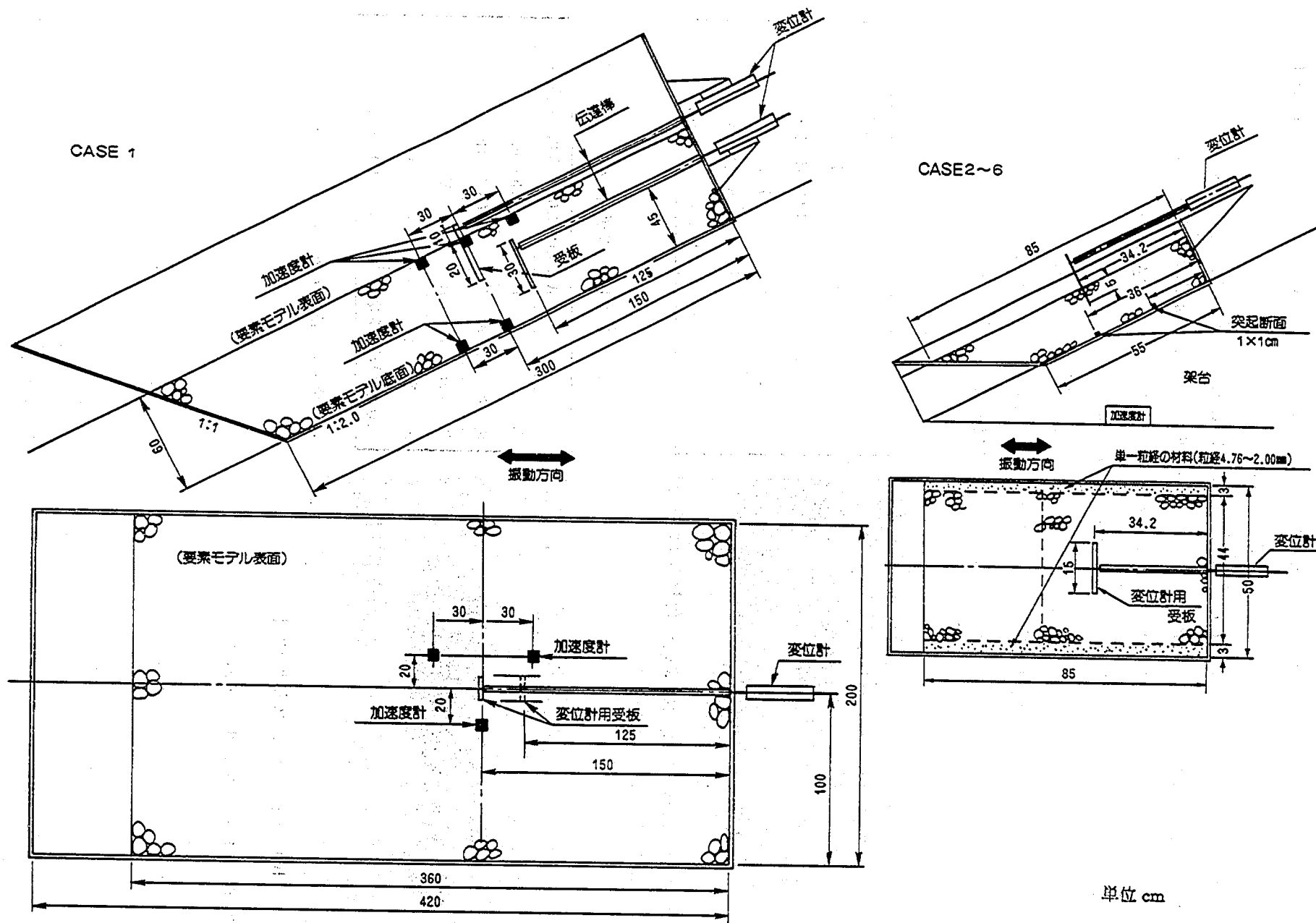


図-4.4 センサーの配置図

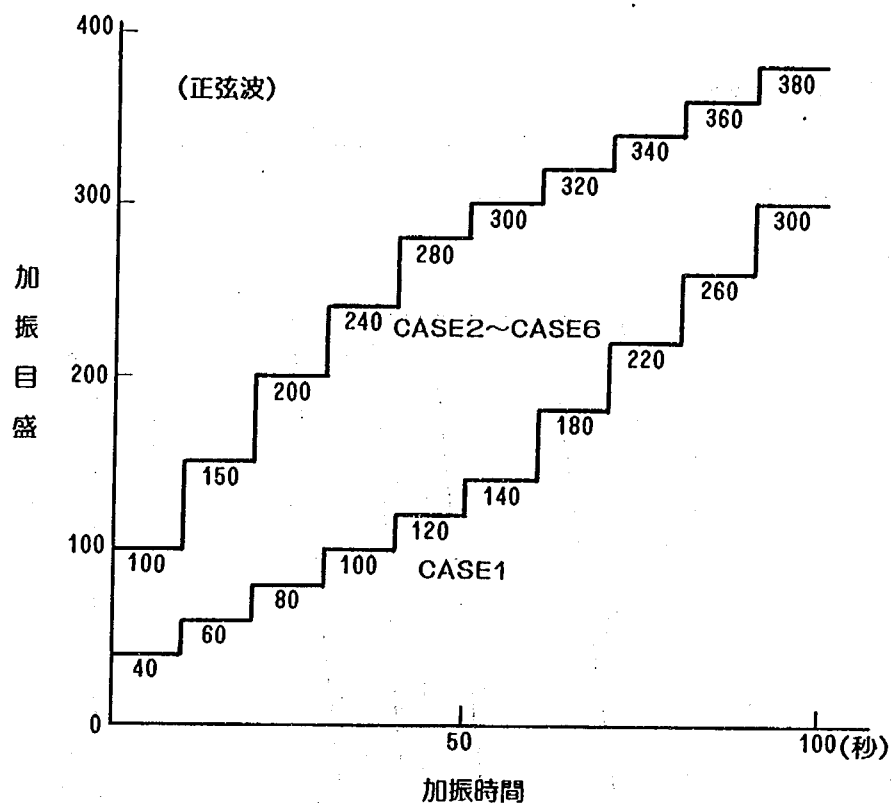


図 - 4. 5 加振パターン

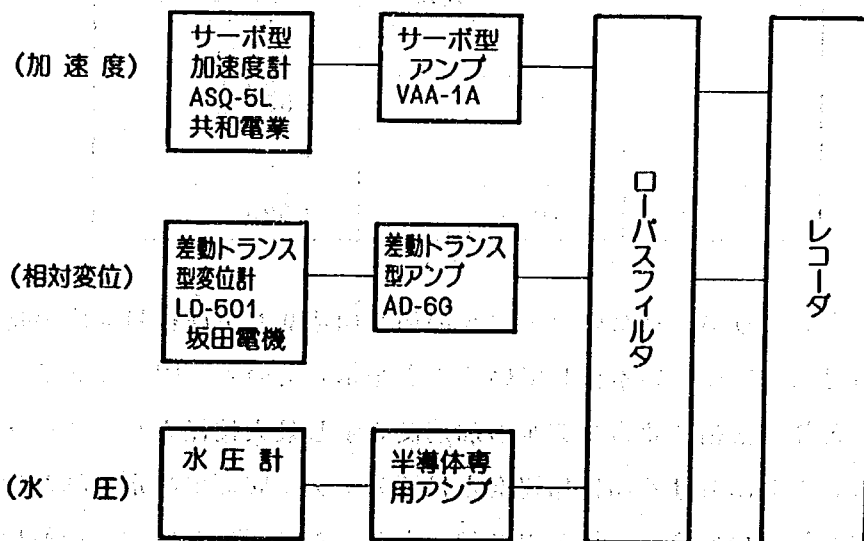
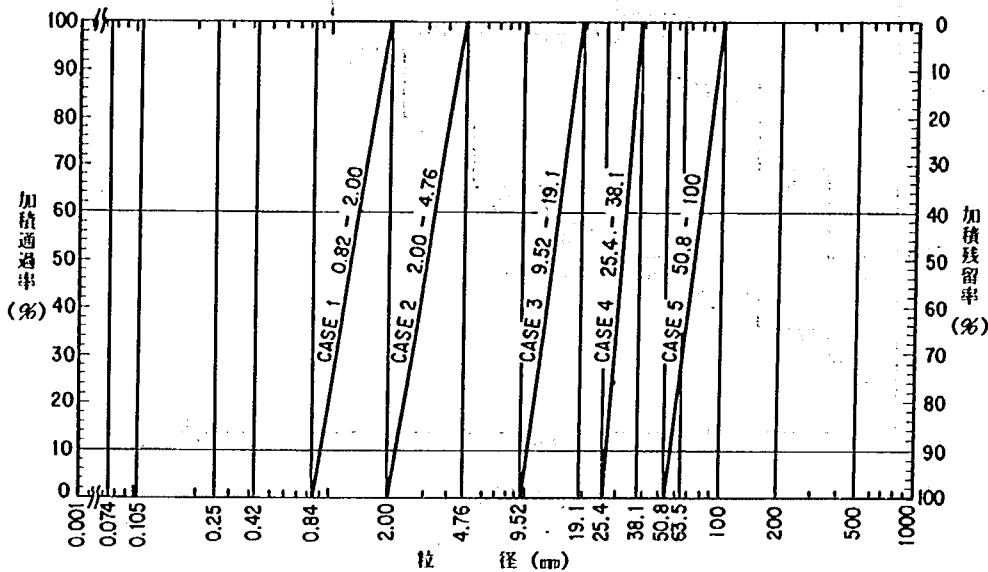


図 - 4. 6 計測ブロック図

5. 実験結果および考察

5.1 材料の最大粒径の効果

図－5.1に示すように最大粒径が100 mm，38.1 mm，19.1 mm，4.76 mm，2.00 mm の単一粒径の材料を用いて実験した。各々の粒径で作製した要素モデルの密度は，表－5.1に示すように約1.5 t/m³である。



図－5.1 試 験 粒 度

表－5.1 各ケース毎の密度

ケース	最 大 粒 径	密 度 (ρ_d)
1 - 1	2.00 mm	1.523 t / m ³
1 - 2	4.76	1.534
1 - 3	19.1	1.551
1 - 4	38.1	1.523
1 - 5	100	1.525

図－5.2は，実験より得られた要素モデルの加振加速度および相対変位の時刻歴の一例である。相対変位量は加振に伴ない累積していくことを示している。図－5.3は，横軸に要素モデルの相対変位をとり，縦軸に要素モデルの加速度を示し最大粒径をパラメータにしてプロットしたものである。ここにおける加振加速度とは要素モデル底面で測定された加速度値であり，相対変位は一定波数の加振後の変位の累計値である。この図において，加振加速度は，対数で表わした要素モデルの相対変位量と直線関係にあり，どの粒径においても要素モデルの相対変位が増えるにつれて加速度は大きくなっている。つまり，表層のすべりの状態は，一気に生ずるものではなく，加速度の大きさおよび加振時間とともに増加するわけであるが，以下におい

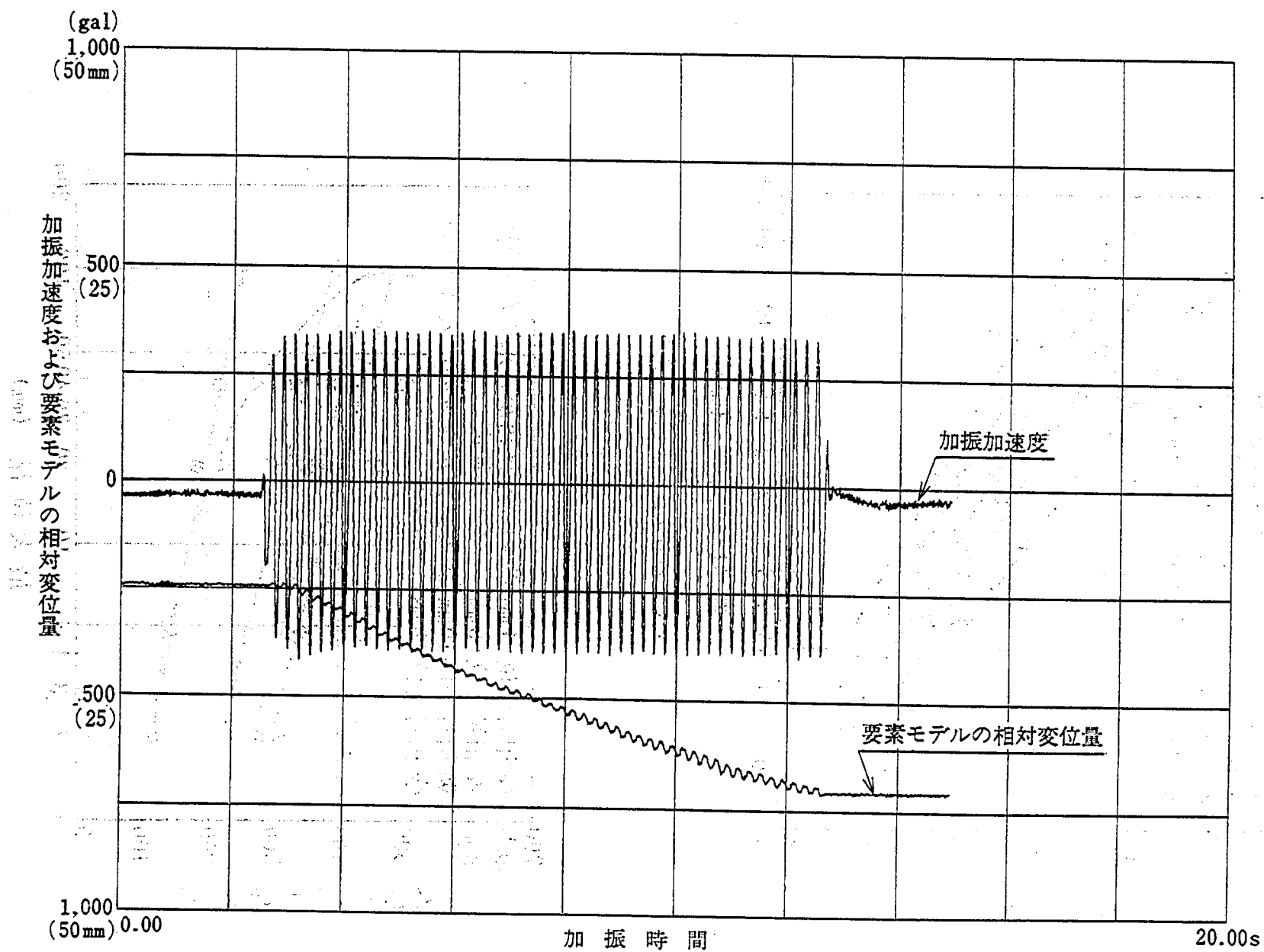


図 - 5.2 加振加速度および相対変位の時刻歴の一例

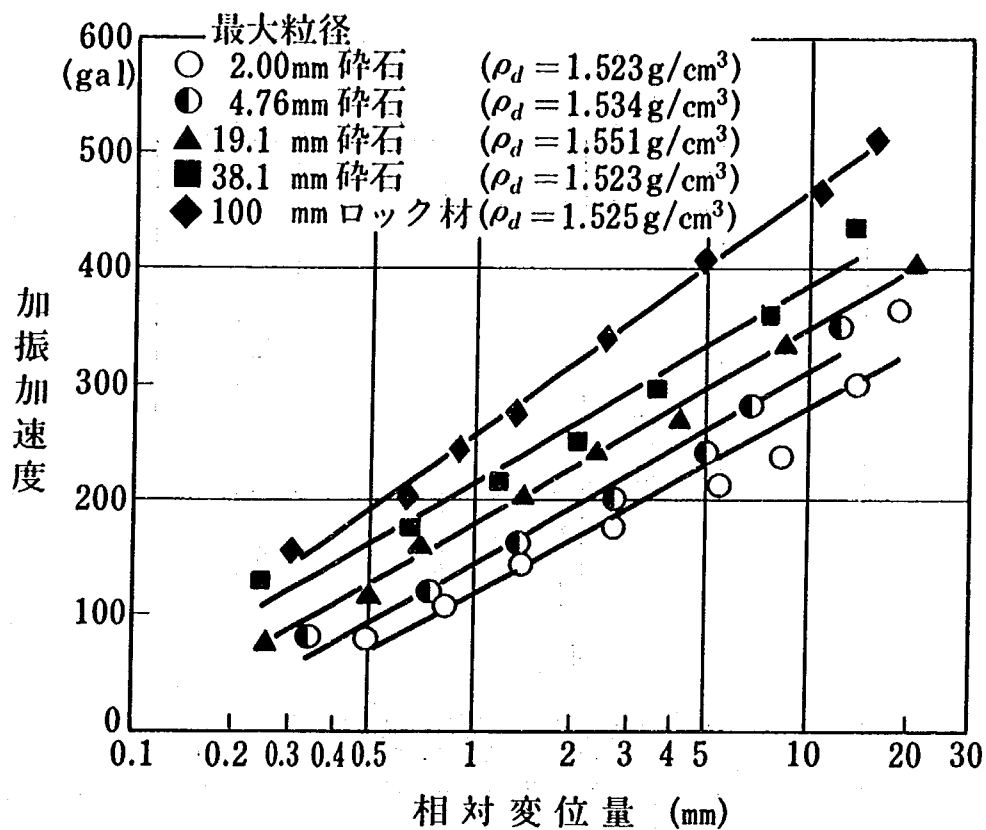


図- 5. 3 相対変位量と加振加速度

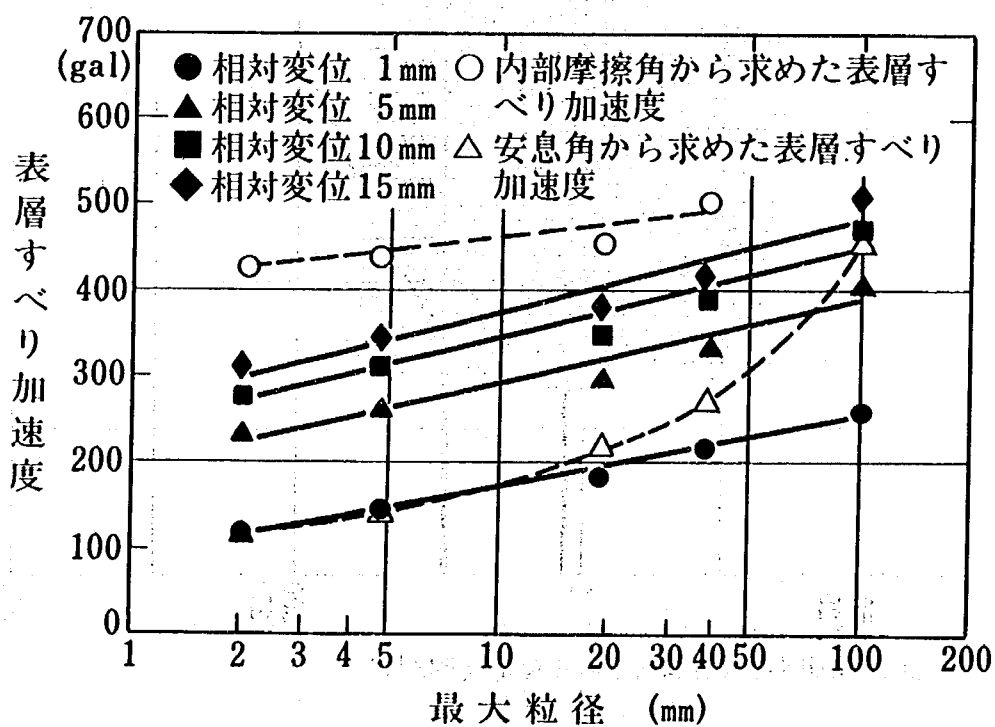


図- 5. 4 最大粒径と表層すべり加速度

ては相対変位が 1, 5, 10, 15, 20 mm に達するときの加振加速度をそれぞれの相対変位量に対応した表層すべり加速度と定義することにする。図-5.4 は図-5.3 において相対変位 1, 5, 10, 15 mm のときの表層すべり加速度と最大粒径との関係である。最大粒径が大きくなるにつれて要素モデル中の表層すべり加速度も大きくなる。例えば要素モデル表層で 10 mm の相対変位を生じさせるには最大粒径 100 mm で作られている要素モデルでは 470 gal の表層すべり加速度であるのに対し、2 mm の粒径で作られている要素モデルはその半分の約 280 gal の表層すべり加速度となる。この結果は、加速度の絶対値は別として定性的に田村²⁾および建部³⁾らの結論と一致する。

これについて材料の摩擦抵抗から検討するために材料の静的安息角の測定と低側圧による三軸圧縮試験を行なった。静的安息角は、模型材料の自然落下によって得られる円錐形の山の勾配から求め、三軸圧縮試験は直径 30 cm、高さ 60 cm の供試体を用い側圧 0.3 kgf/cm² で不飽和状態による圧密排水試験とした。

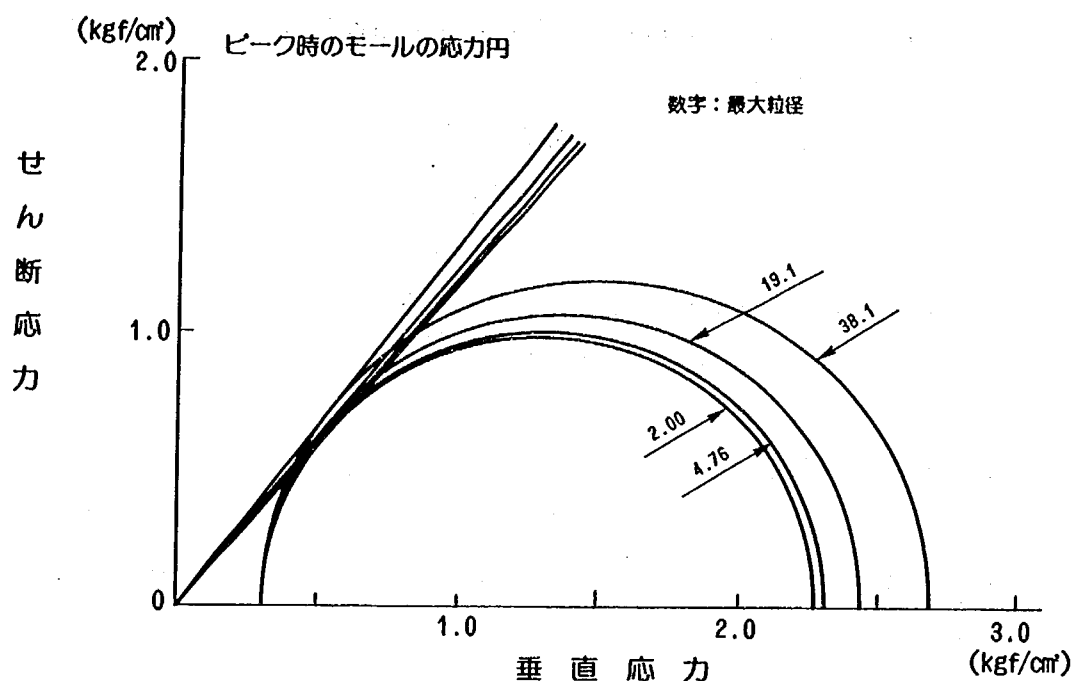
表-5.2 に静的安息角の測定結果を示す。表-5.3 は粘着力成分をゼロとして側圧 0.3 kgf/cm² の内部摩擦角の値であり、図-5.5 にはそのモールの応力円を示す。図-5.6 は横軸に最大粒径をとり縦軸に静的安息角および内部摩擦角を示したものである。静的安息角は最大粒径が大きくなるに従い大きな値を示し、内部摩擦角も静的安息角ほどではないが最大粒径が大きくなるに従い大きくなっている。この結果は「最大粒径が小さいほど内部摩擦角が大きくなる」という既往の松本¹³⁾および大本¹⁴⁾らの試験結果と異なる。この理由としては、①既往の最大粒径の効果を求めた三軸圧縮試験（側圧 2～8 kgf/cm²）と比べ今回の試験が低側圧であること、②今回の試験では単一粒径で細粒分の影響がないことが考えられる。

表-5.2 静的安息角（自然落下による方法）

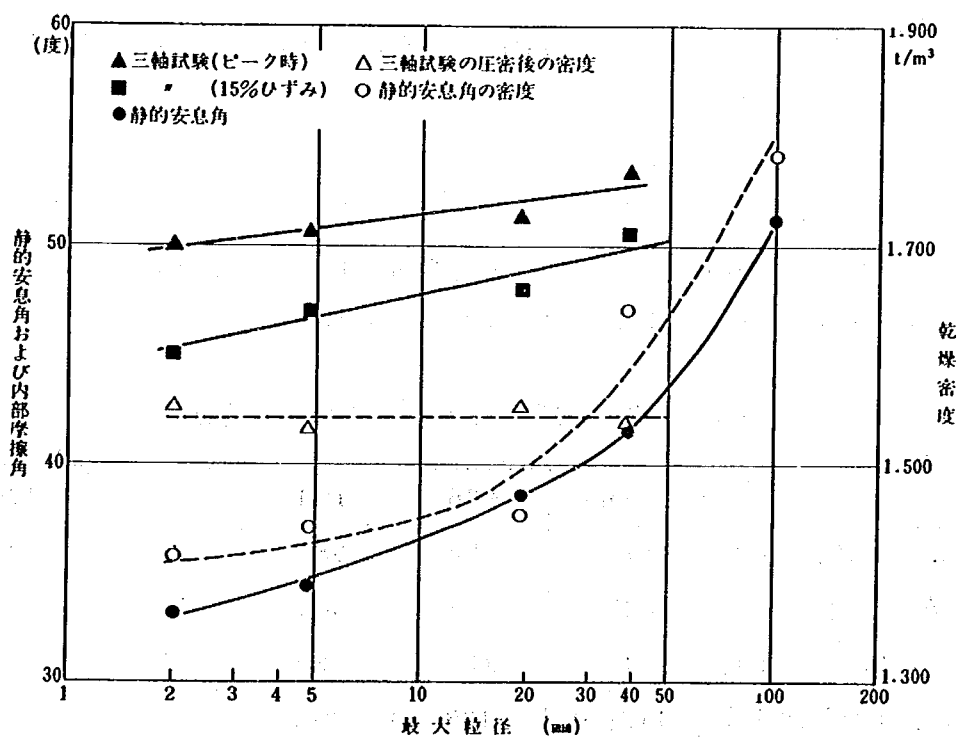
粒径		2.00 mm	4.76	19.1	38.1	100
静 的 安 息 角 ϕ_0	1 回	33.7°	34.4	38.6	41.8	50.7
	2 回	32.4°	34.1	38.7	41.4	51.6
	平均	33.1°	34.3	38.7	41.6	51.2
表層すべり加速度		112 gal	133	211	263	449

表-5.3 内 部 摩 擦 角

粒径	2.00 mm	4.76	19.1	38.1
ピーク時の ϕ_0	49.92°	50.55	51.30	53.47
表層すべり加速度	423 gal	436	451	497
15%ひずみの ϕ_0	44.94°	46.98	47.85	50.41
表層すべり加速度	325 gal	365	382	433



図－5.5 各粒径毎のモールの応力円



図－5.6 最大粒径と静的安息角および内部摩擦角

無限斜面に一定の水平加速度が作用し斜面が非粘着性の砂礫材料であるとき次の(1)式により表層すべりを生じる加速度(α)を求めることができる。

$$\alpha = \tan(\phi_0 - \theta) \cdot g \quad \dots\dots\dots(1)$$

ϕ_0 : 静的安息角または内部摩擦角(度)

θ : 斜面の勾配(度)

g : 重力の加速度 980 gal

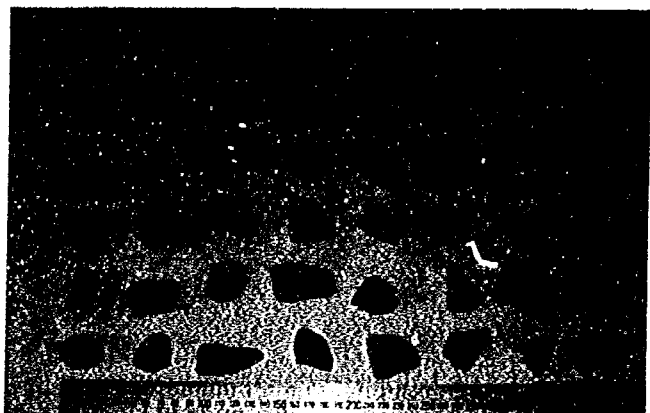
そこで(1)式に静的安息角および内部摩擦角を用いて表層すべり加速度を求めた結果を図-5.4に記入する。三軸圧縮試験による内部摩擦角から求めた表層すべり加速度は、図-5.4によれば振動台上の要素モデルに15mmの変位を与える加振加速度より更に大きい。また、静的安息角より求めた表層すべり加速度は最大粒径2mmと5mmのときは要素モデルで1mmの相対変位の表層すべり加速度に一致し、粒径が大きくなると更に大きな相対変位に対応している。非粘着性斜面の表層すべりを評価する試験法として静的安息角試験がよいのか、低側圧の三軸圧縮試験がよいのか問題あるところであるが、少なくとも粒径の効果については、振動台要素モデル試験、静的安息角試験、三軸圧縮試験の三者が、粒径の増加とともに強度も増加する定性的な傾向の点で一致している。

5.2 材料の粒度分布の影響

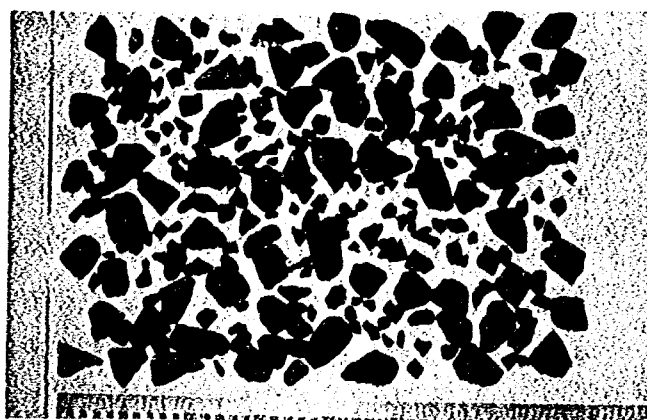
堤体材料の粒度と堤体表層すべり時の加速度との関係を把握するために図-5.7、表-5.4に示す6種類の粒度を用いて要素モデルを作製した。写真-5.1に試験粒度のサンプルを示す。要素モデルの形状はCASE1と同様に台形状であり長さ55~85cm、厚さ15cm、幅50cmである。各々の粒度の最大粒径は25.4mmに固定し、均等係数を1, 2, 4, 10, 20, 48と変えた。各々の粒度において同一密度で実験するのが不可能であるため相対密度の指標を用い相対密度100%で試験した。相対密度を求めるための試験は、直径30cm、高さ35cmの供試体を用いる突き固め試験によった。表-5.5に突き固め試験条件を示す。表-5.6は試験結果の一覧表である。図-5.8は、横軸に突き固めエネルギーをとり、縦軸に乾燥密度および破碎率をプロットしたものである。突き固めエネルギーが1Ecをこえるとどの均等係数においても密度は落ち着く傾向にある。破碎率は、均等係数が1, 2, 4の材料で突き固めエネルギーが増えるに従い増える傾向にある。例えば均等係数1の破碎率は5Ecで約35%に達する。従って、最大密度の決定にあたっては、均等係数1の破碎率を考慮し、突き固めエネルギー1Ecにおける密度とした。最小密度は突き固めエネルギーが0Ecの状態である。表-5.7に各粒度における最小密度および最大密度を示す。

表-5.4 粒径別残留百分率

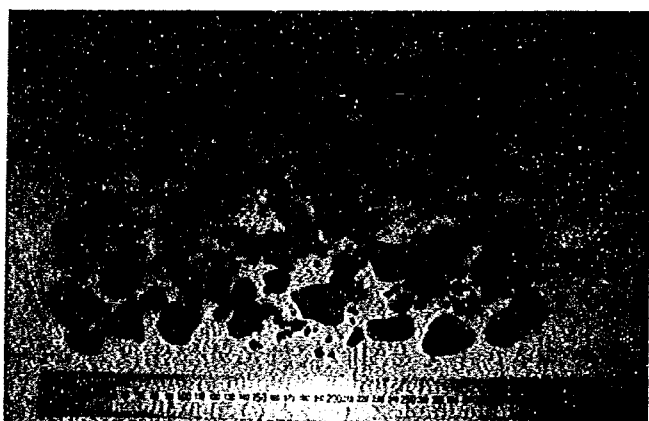
粒径 呼び名	25.4mm ~19.1mm	19.1 9.52	9.52 4.76	4.76 2.00	2.00 0.84	0.84 0.25	0.25 0.074
(単一粒径)	100%	—	—	—	—	—	—
2	65	25	10	—	—	—	—
4	55	25	10	10	—	—	—
10	45	25	10	10	10	—	—
20	35	25	10	10	10	10	—
48	25	25	10	10	10	10	10



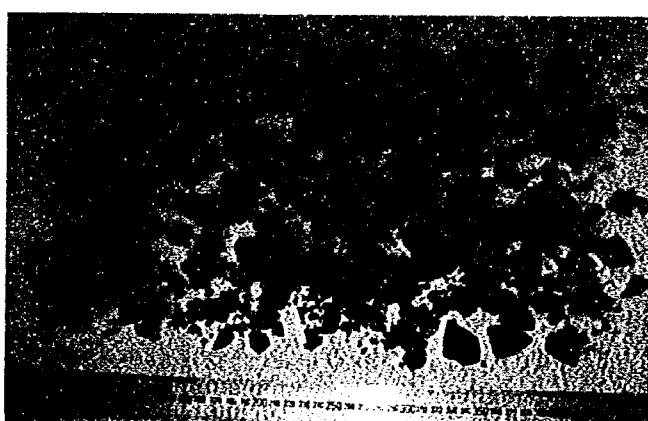
$U_c = 1$



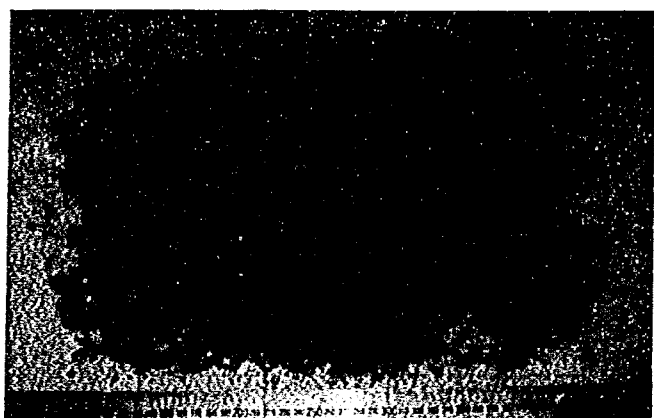
$U_c = 2$



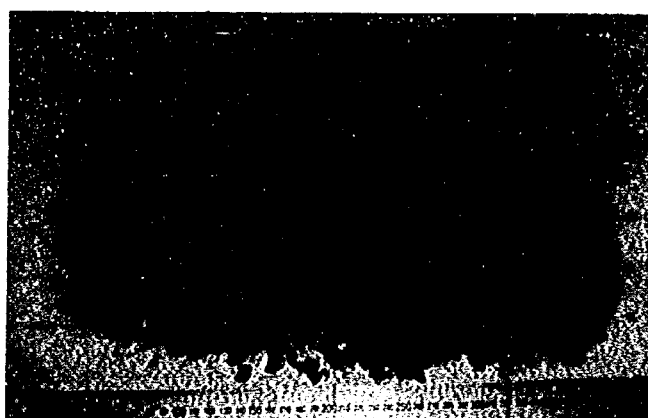
$U_c = 4$



$U_c = 10$



$U_c = 20$



$U_c = 48$

写真- 5. 1 試験粒度のサンプル

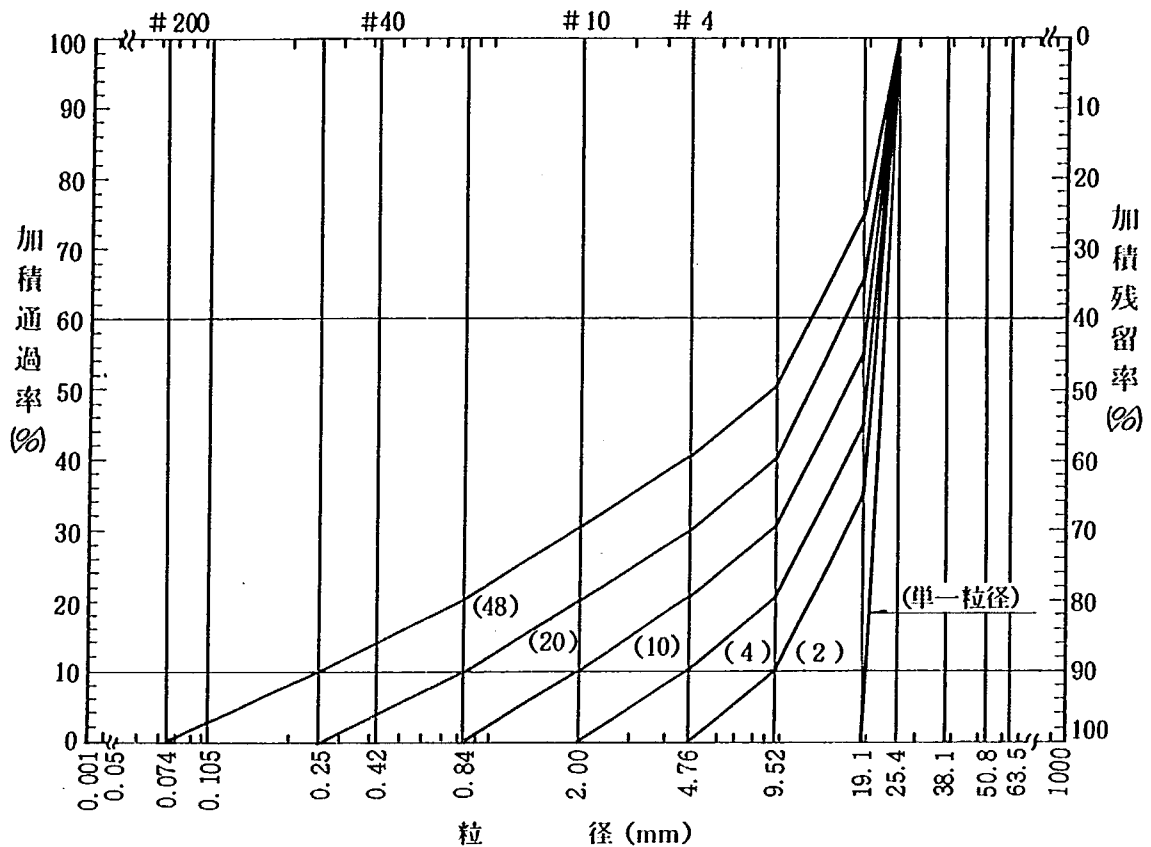


図-5.7 粒度曲線 (CASE 2)

表-5.5 突き固め試験条件

ランマー直径および重量	直径 15 cm 重量 15 kgf
ランマー落下高	50 cm
突き固めエネルギー	0.5, 1, 2, 3, 5 EC (1 EC = 5.6×10^4 mkgf/m ³)
突き固め層数	3 層
最終目標高さ	35 cm

表-5.6 突き固めエネルギーと乾燥密度および破砕率

突き固め エネルギー Ec	Uc = 1 (単一粒径)		Uc = 2		Uc = 4		Uc = 10		Uc = 20		Uc = 48	
	乾燥密度 t/m ³	破砕率 %	乾燥密度 t/m ³	破砕率 %	乾燥密度 t/m ³	破砕率 %	乾燥密度 t/m ³	破砕率 %	乾燥密度 t/m ³	破砕率 %	乾燥密度 t/m ³	破砕率 %
0	1.397	1.0	1.506	0	1.548	0.7	1.669	1.3	1.845	1.1	1.890	1.4
0.5	1.565	14.8	—	—	1.724	1.6	1.852	2.7	1.951	2.0	2.088	2.4
1	1.620	21.4	1.686	9.4	1.766	4.9	1.882	5.5	1.992	2.9	2.126	2.6
2	1.663	26.1	1.710	11.4	1.820	7.5	1.918	7.6	2.016	3.3	2.191	2.5
3	1.705	34.2	—	—	1.862	10.3	1.947	7.5	2.045	6.4	2.226	3.5
5	1.763	34.8	—	—	1.868	15.8	1.972	8.7	2.091	5.6	2.253	3.1

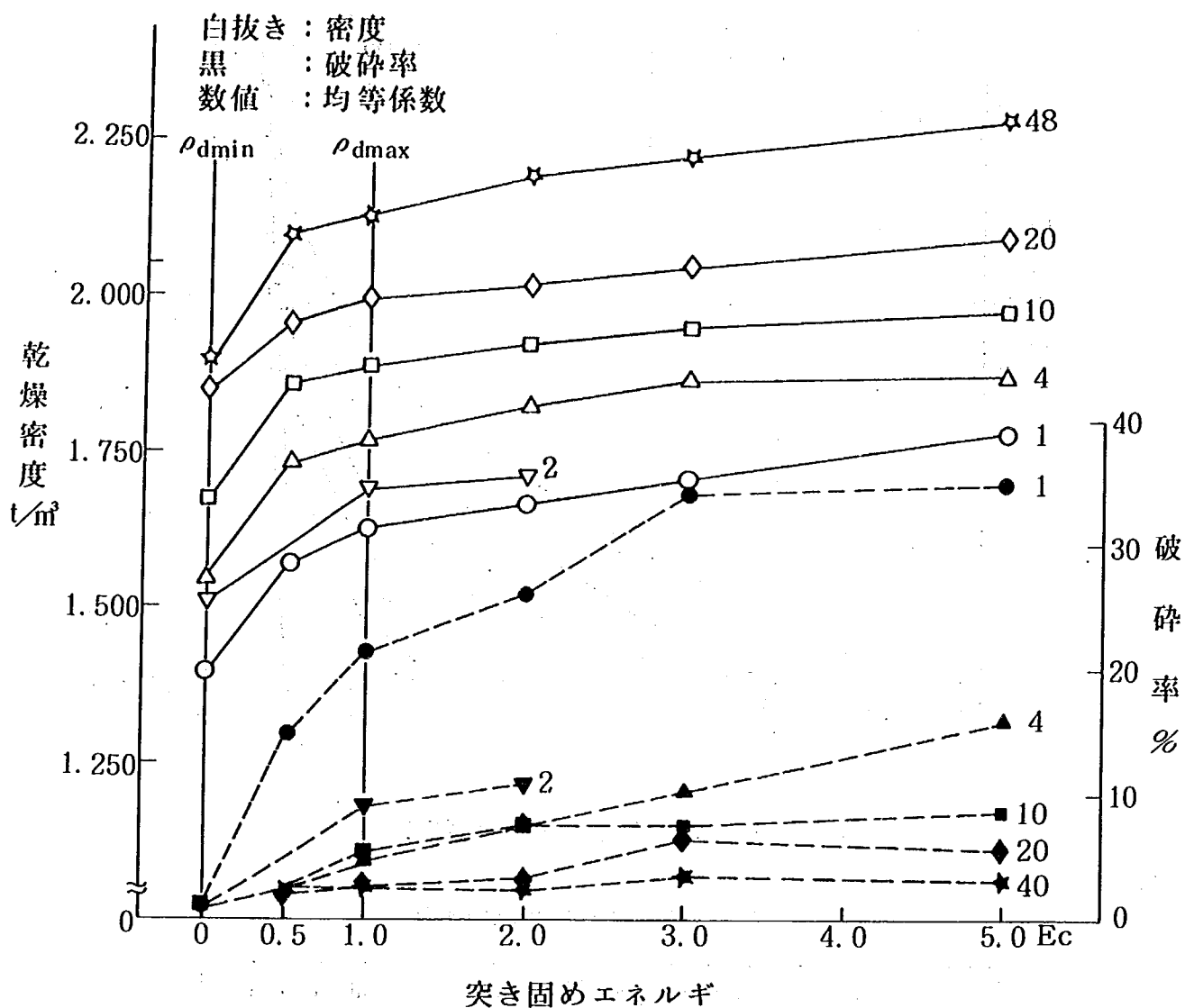


図-5.8 突き固めエネルギーと乾燥密度および破碎率

表-5.7 最小密度および最大密度

均等係数 単一粒径	最大密度		最小密度	
	$\rho_{d \max}$	$e \min$	$\rho_{d \min}$	$e \max$
1	1.620 t/m^3	0.64	1.397 t/m^3	0.90
2	1.686	0.57	1.508	0.76
4	1.766	0.50	1.548	0.71
10	1.882	0.41	1.669	0.59
20	1.992	0.33	1.845	0.44
48	2.126	0.25	1.890	0.40

注) $e = \frac{Gb}{\gamma d} - 1$ $Gb : 2.651$

図-5.9は、横軸に要素モデルの加振加速度を示し、縦軸に相対変位量を示し各々の粒度毎の要素モデルの動きを表わしたものである。均等係数が1, 2, 4, 10の要素モデルの加振加速度と相対変位の関係は、均等係数が20, 48の要素モデルのそれとは異なっている。均等係数が大きい($U_c = 20, 48$)要素モデルは、400 galの加振加速度までの相対変位量はきわめて小さく、400 gal以上の加振加速度になって一気に相対変位量が増える。すなわち、これは均等係数の大小によって要素モデルの破壊モードが異なることを示している。なお、図中で点が止まっているのは、それ以上の加振加速度を加えたために要素モデルの相対変位が変位計の容量を超えたためにプロットできないことによる。

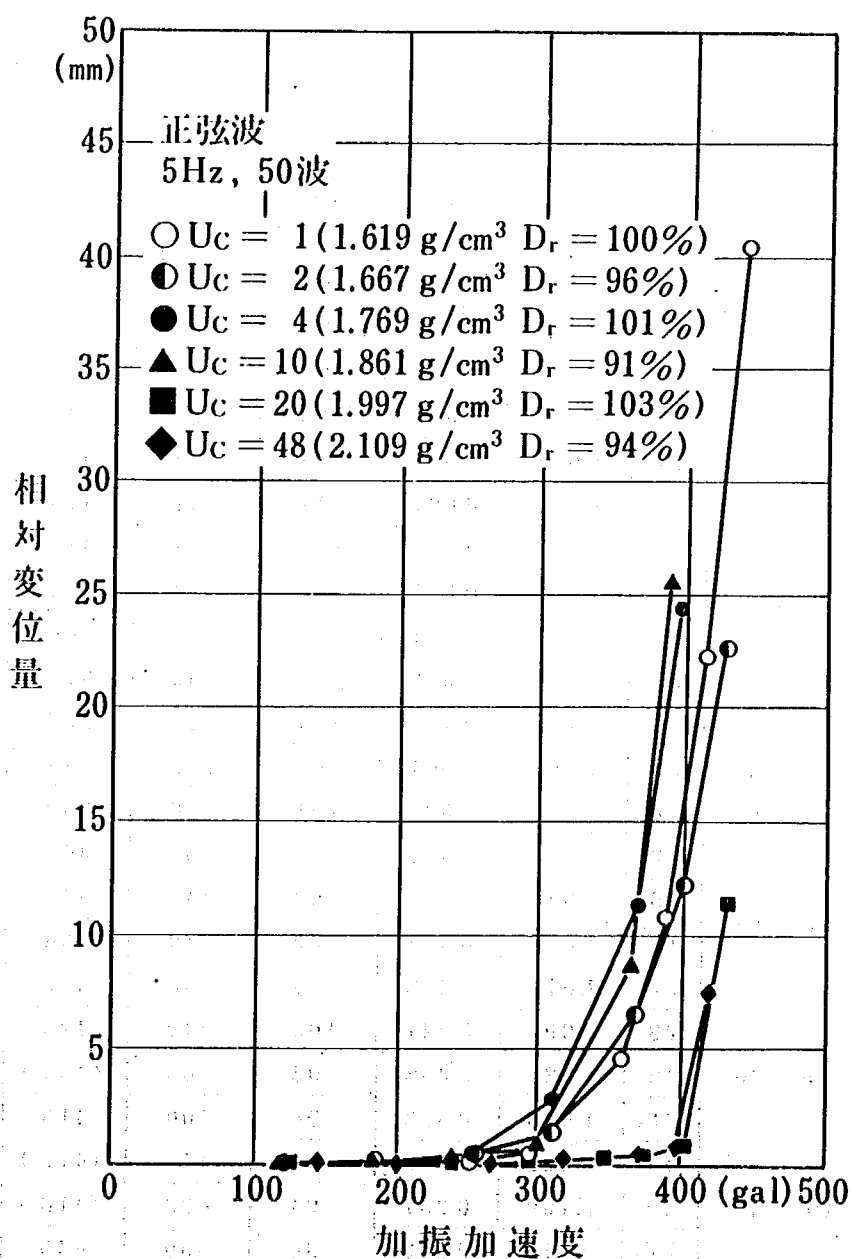


図-5.9 加振加速度と相対変位量の一例

表-5.8, 図-5.10は各均等係数毎に, 相対変位が5, 10, 20 mmにおける表層すべり加速度を示したものである。表層すべり加速度はどの相対変位でも, 均等係数が1から10までの要素モデルまでは, ほぼ横ばいか減少の傾向を示すが, 均等係数20および48の要素モデルになると表層すべり加速度は大きくなる。

図-5.11は横軸に各々の均等係数における密度(相対密度100%の状態)をとり, 縦軸に表層すべり加速度を示したものである。密度と表層すべり加速度との関係は直線的でなく, 粒度を考慮しないで考えるならば, 密度が 2.0 t/m^3 から表層すべり加速度が大きくなることを示している。つまり, 単純に密度が大きくなれば表層すべり加速度が大きくなるとは言えず粒度分布も影響していると考えられる。

表-5.8 任意相対変位量における表層すべり加速度

ケース	粒 度	試験 番号	乾燥密度 ρ_d	間 隙 比 e	相対密度 Dr	表 層 す べ り 加 速 度		
						相対変位 5 mm	相対変位 10 mm	相対変位 20 mm
2-1	Uc = 1 (単一粒径)	36	t/m^3 1.607	0.650	95	gal 322	gal 362	gal 393
		35	1.612	0.645	97	317	346	379
		34	1.604	0.653	94	337	376	401
		33	1.619	0.637	100	358	383	407
		31	1.631	0.625	104	353	390	415
		26	1.650	0.607	111	361	390	410
		平均	1.621	0.636	100	341	375	401
2-2	Uc = 2	75	1.687	0.571	100	334	372	405
		67	1.667	0.581	96	349	386	420
		平均	1.677	0.576	98	342	379	413
2-3	Uc = 4	30	1.769	0.499	101	324	357	386
		22	1.766	0.501	100	312	342	375
		平均	1.768	0.500	101	318	350	381
2-4	Uc = 10	32	1.861	0.425	91	332	365	379
		28	1.886	0.406	102	342	364	387
		18	1.883	0.408	100	339	358	369
		平均	1.877	0.413	98	338	362	378
2-5	Uc = 20	23	1.997	0.327	103	412	425	(435)
		49	1.981	0.338	93	388	(404)	(412)
		平均	1.989	0.333	98	400	415	424
2-6	Uc = 48	71	2.122	0.249	98	452	(472)	(478)
		29	2.109	0.257	94	408	(418)	(430)
		平均	2.116	0.253	96	430	445	454

()内は推定加速度

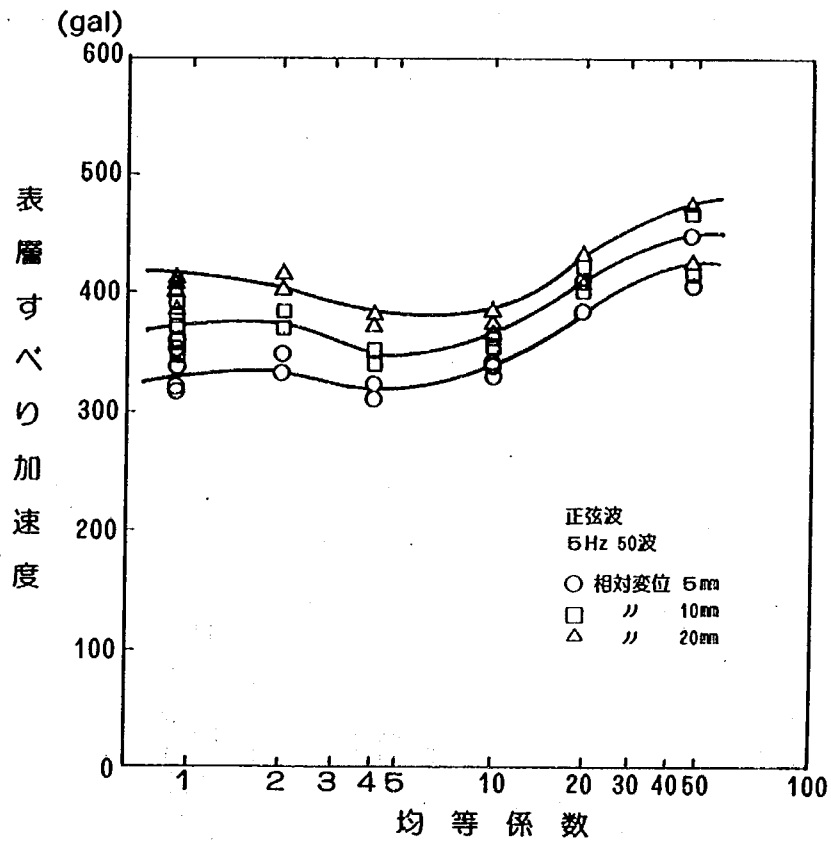


図- 5. 10 均等係数と表層すべり加速度

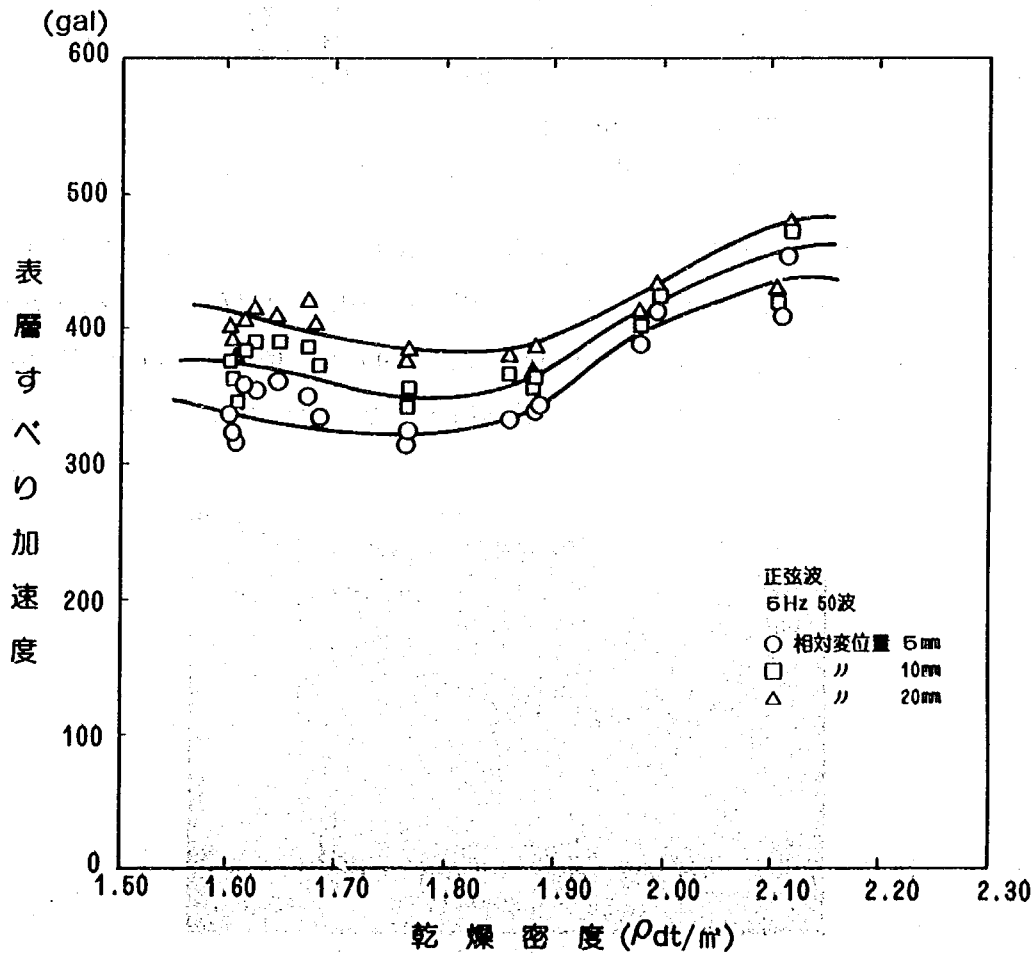


図- 5. 11 乾燥密度と表層すべり加速度

図-5.12は、相対変位量と表層すべり加速度との関係を均等係数をパラメータにしてプロットしたものである。相対変位量5mmの場合の $U_c = 4$ と $U_c = 48$ の表層すべり加速度との差は112 galであるが、相対変位量20mmにおいては $U_c = 10$ と $U_c = 48$ の表層すべり加速度との差は76 galとなる。また、均等係数20, 48の表層すべり加速度は、相対変位量が増えてもあまり変化しないことを示している。すなわち、均等係数と表層すべり加速度との関係は、相対変位量に左右され明確な関係が得られにくい。

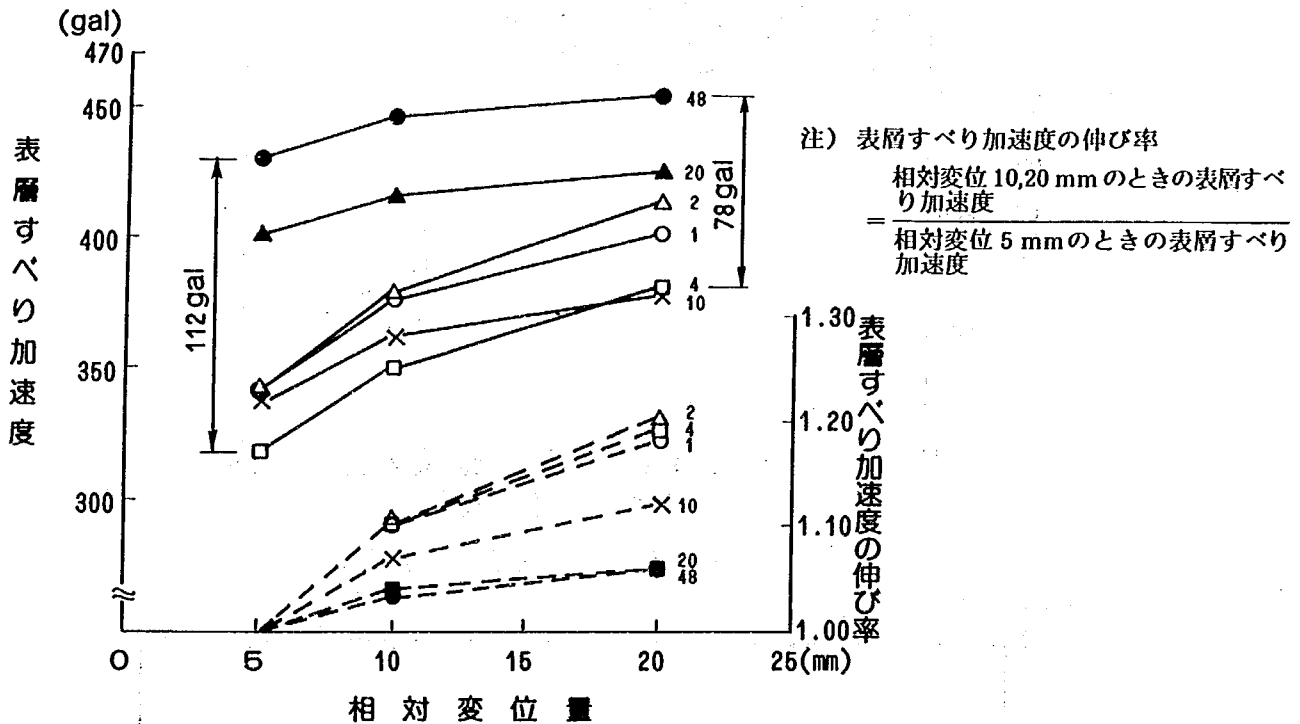


図-5.12 相対変位量と表層すべり加速度

表-5.9, 表-5.10に静的安息角の測定結果を示す。この場合の静的安息角は、①5.1項のときと同様に材料の自然落下によってできる円錐状の山の勾配から求める方法と、②写真-5.2に示すように三角柱状の箱(底辺40cm, 高さ20cm, 奥行き40cm)に材料を投入後に締めつけたものを傾けていくときに斜面が崩れ出すときの角度から求める2通りの方法によった。

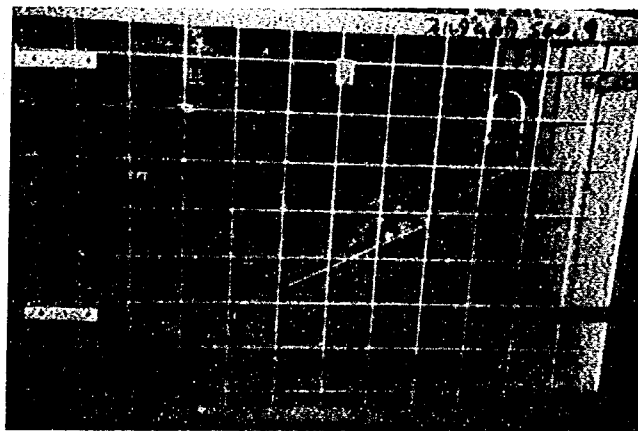


写真-5.2 静的安息角の測定状況

表-5.9 静的安息角(①の方法)

均等係数		1		4		10		20		48	
		安息角	密度	安息角	密度	安息角	密度	安息角	密度	安息角	密度
静的安息角	1	37.73°	t/m ³ 1.492	37.281	1.532	36.25	1.597	36.25	1.663	34.35	1.758
	2	39.92	1.449	36.88	1.590	36.37	1.619	36.69	1.638	35.19	1.788
	3	38.53	1.435	36.50	1.525	35.85	1.580	36.03	1.672	—	—
	平均	38.73	1.459	36.89	1.547	36.16	1.599	36.32	1.658	34.77	1.773
表層すべり加速度		gal 211	—	178	—	166	—	168	—	141	—

表-5.10 静的安息角の測定(②の方法)

	均等係数	回数	乾燥密度 ρ_d t/m ³	相対密度 Dr %	2~3個のり すべり (度)	表層すべり 速度 gal	全体のすべり (度)	表層すべり 速度 gal
空虚	1	1	1.521	59	58.12	597	60.36	650
		2	1.518	58	54.31	511	59.17	621
		3	1.521	59	55.21	530	60.76	660
		平均	1.520	59	55.88	546	60.10	644
	2	1	1.620	65	54.31	511	58.19	598
	4	1	1.700	72	54.06	505	58.15	597
	10	7	1.805	67	55.39	534	57.49	582
		2	1.790	60	53.93	502	58.98	617
		平均	1.798	64	54.66	518	58.24	600
	20	1	1.903	41	55.09	528	59.49	629
		2	1.935	63	57.05	572	60.05	643
		平均	1.919	52	56.07	550	59.77	636
	48	1	2.089	86	56.02	548	57.83	590
		2	2.057	73	56.59	561	58.89	615
		平均	2.073	80	56.31	555	58.36	603
満水	1	1	1.526	61	55.51	262	60.76	321
	2	1	1.609	59	55.32	267	58.12	298
	4	1	1.693	69	55.32	273	58.29	308
	10	1	1.801	65	54.27	269	58.75	323
	20	1	1.928	58	55.79	296	59.11	338
	48	1	2.042	67	55.97	306	58.41	337

図-5.13は、横軸に均等係数を取り縦軸にそれぞれの方法で求めた静的安息角を示したものである。材料の自然落下によるものは、均等係数が増えていくのに従い静的安息角はだんだんと減少していく。一方、相対密度100%で締固めたものを傾けていくときの静的安息角は均等係数に関係なくほぼ一定の値である。しかも、空虚時と洪水時との差は明確でない。前者と後者の絶対値の大きさは、実験方法等のちがいもあってかなりの差がある。

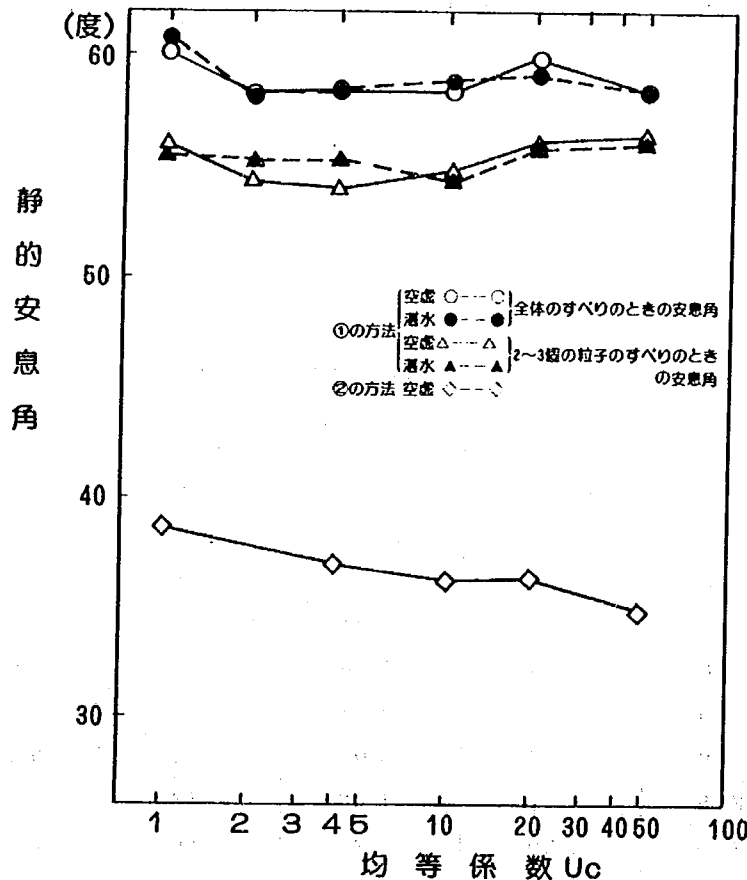


図-5.13 均等係数と静的安息角との関係

三軸圧縮試験は直径30cm、高さ60cmの供試体で不飽和状態において側圧0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm²の圧密排水試験を行った。表-5.11にその試験結果を示す。図-5.14は、均等係数と内部摩擦角との関係である。側圧0.5, 1.0, 1.5 kgf/cm²から得られる内部摩擦角は均等係数が増えるに従い、均等係数20まで増加するがそれ以降は横ばいである。これに対し、粘着力は均等係数が増えるに従い、均等係数20まで減少していく。一方、粘着力成分をゼロにして求めた内部摩擦角は、側圧0.5 kgf/cm²では均等係数にあまり影響を受けず、ほぼ横ばいの状態である。

図-5.15は、均等係数と最大軸差応力との関係を示したものである。側圧が1.5 kgf/cm²になれば、均等係数と最大軸差応力との相関が強く、均等係数が大きくなれば最大軸差応力は大きくなっていくようであるが、側圧が小さいときは均等係数に影響を受けない。

表-5.11 試験結果一覧表

均等 係数	試 験 番 号	側圧 σ_3	初 期 乾燥密度 γ_{do} 相对密度 Dro	平 均 乾燥密度 γ_d 相对密度 Dr	間 隙 比 の 変 化					破 壊 時						ϕ_o	$\phi \cdot C$
					e_o	$\bar{e}_o$	e_c	$\bar{e}_c$	e_f	$(\sigma_1 + \sigma_3)_{\max}$ $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$	ε_f	$\Delta V/V$	E	ν	σ_1/σ_3		
1	T-8-MN	0.5	1.630 109%	1.617 105%	0.631	0.641	0.607	0.613	0.589	4.13 3.17	0.038	-0.0262	83.66	0.8475	7.604	50.13°	37.94° kgf/cm ² 0.41
	ST-15	1.0	1.620 102		0.639		0.607		0.600	6.92 4.92	0.043	-0.0245	114.58	0.7861	5.920	45.31	
	ST-1	1.5	1.600 104		0.654		0.626		0.595	9.45 6.45	0.042	-0.0159	153.57	0.6871	5.300	43.04	
10	ST-3	0.5	1.880 110	1.880 106	0.412	0.410	0.403	0.398	0.380	4.12 3.12	0.030	-0.0233	104.03	0.8941	7.240	49.23	45.84 0.14
	ST-2	1.0	1.880 102		0.410		0.396		0.391	7.97 5.97	0.043	-0.0140	138.98	0.6634	6.970	48.51	
	ST-10	1.5	1.880 107		0.409		0.395		0.379	11.20 8.20	0.054	-0.0210	151.94	0.6934	6.467	47.07	
20	ST-7	0.5	1.990 127	1.990 111	0.330	0.331	0.322	0.321	0.302	4.37 3.37	0.028	-0.0215	120.71	0.8853	7.740	50.46	48.98 0.03
	ST-14	1.0	1.990 109		0.329		0.319		0.313	7.98 5.98	0.035	-0.0127	171.14	0.6844	6.980	48.54	
	ST-11	1.5	1.990 98		0.333		0.312		0.314	12.53 9.53	0.044	-0.0145	216.73	0.6633	7.353	49.51	
48	T-14-M	0.5	2.120 95	2.127 102	0.252	0.247	0.245	0.239	0.245	4.71 3.71	0.017	-0.0053	218.35	0.6544	8.420	51.97	49.23 0.05
	ST-8	1.0	2.130 108		0.244		0.239		0.230	8.01 6.01	0.021	-0.0113	286.43	0.7638	7.010	48.62	
	ST-12	1.5	2.130 103		0.244		0.233		0.231	12.85 9.85	0.028	-0.0106	352.11	0.6875	7.567	50.04	

$$E = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}}{\varepsilon_f}$$

$$\phi_o = \sin^{-1} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

$$Dro = \frac{\rho d_{\max}(\rho d - \rho d_{\min})}{\rho d(\rho d_{\max} - \rho d_{\min})} \times 100 (\%)$$

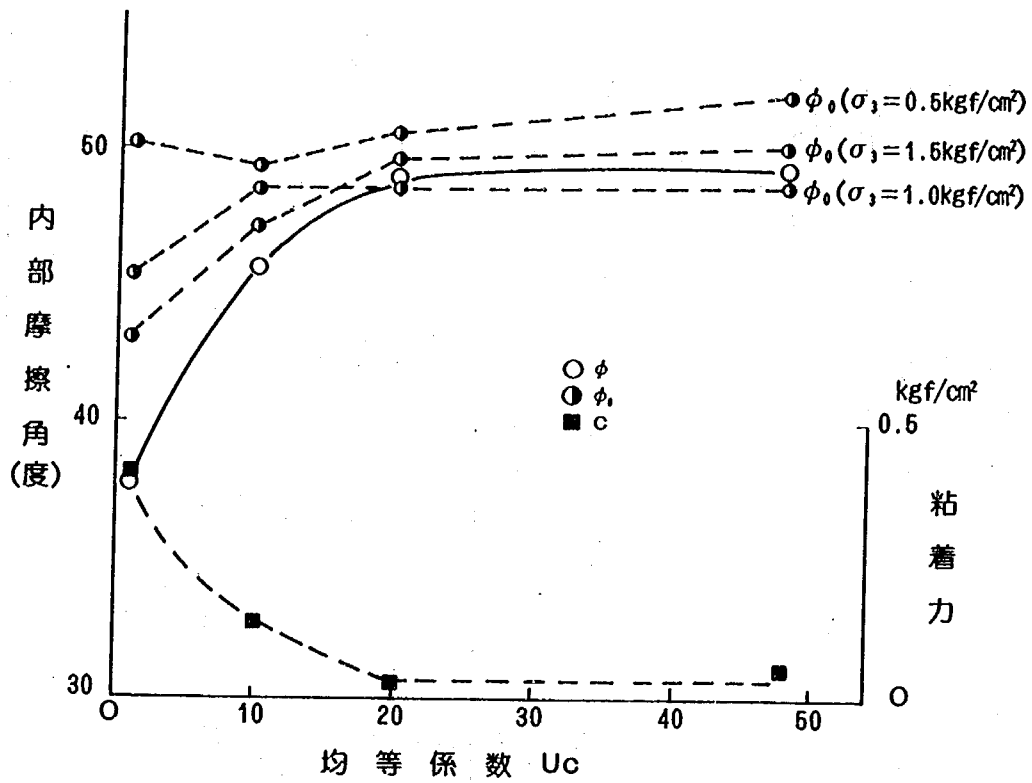


図 - 5. 14 均等係数と内部摩擦角との関係

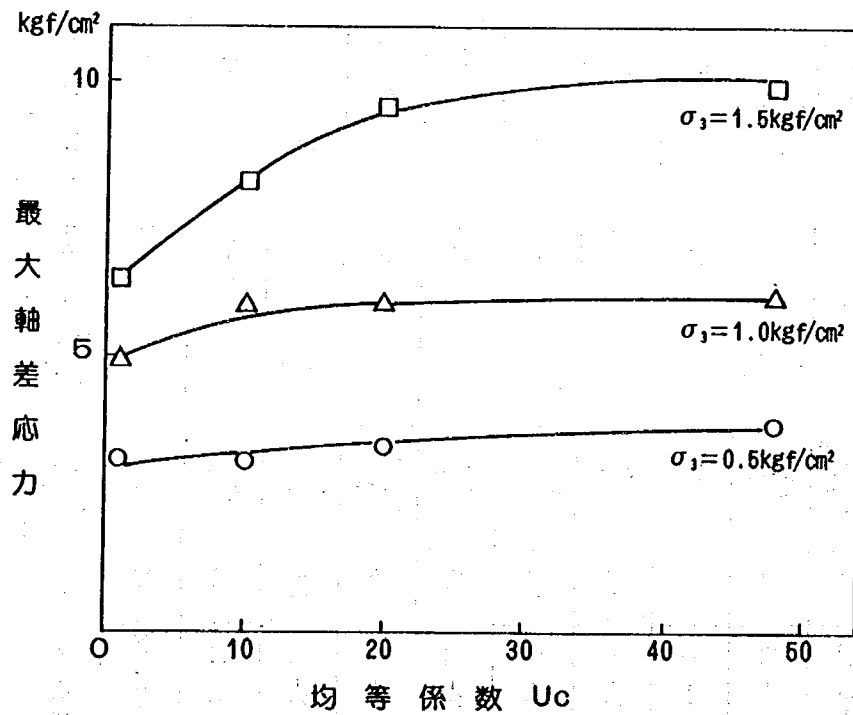


図 - 5. 15 均等係数と最大軸差応力との関係

表-5.12, 図-5.16 は, 相対変位 10 mm における表層すべり加速度と前項で述べた(1)式に表-5.9, 表-5.10 の値を代入して表層すべり加速度を求めて均等係数との関係を求めたものである。要素モデル実験から求められる表層すべり加速度は, 均等係数 10 まではこの影響が少ないが, それ以上の均等係数から増える。静的安息角から得られる表層すべり加速度(②の方法)と均等係数との関係は要素モデル実験と同様の傾向を示すものの, 表層すべり加速度の値は要素モデル実験より 100 ~ 200 gal 程度大きい。①の方法による静的安息角を用いると表層すべり加速度は, 均等係数が大きくなるに従い減少し, 更には表層すべり加速度の値は要素モデル実験に比べかなり小さい。内部摩擦角から求められる表層すべり加速度は, 均等係数 20 まで急激に増加しそれ以上の均等係数になっても変らない。ただし, 粘着力成分をゼロとして求めた側圧 0.5 kgf/cm² の場合の表層すべり加速度は, 要素モデル実験と同様な傾向となり, しかも相対変位 10 mm のときよりも大きめの表層すべり加速度となる。すなわち, 均等係数と表層すべり加速度との関係は, 材料の自然落下によらない静的安息角と低側圧で粘着力成分を無視した内部摩擦角との相関が強いと考えられる。

表-5.12 均等係数と表層すべり加速度

均 等 係 数		1	2	4	10	20	48	記号
表層すべり加速度								
計 算 値	静的安息角から求めた表層すべり加速度(全体のすべり)	gal 644	gal 598	gal 597	gal 600	gal 636	gal 603	○
	静的安息角から求めた表層すべり加速度(2~3個滑り)	646	511	505	518	550	555	◐
	静的安息角から求めた表層すべり加速度(自然落下)	211	—	178	166	168	141	●
	内部摩擦角から求めた表層すべり加速度	197	—	—	343	404	409	△
	内部摩擦角から求めた表層すべり加速度(0.5 kgf/cm ²)	427	—	—	409	434	465	▲
実 験 値	要素モデル実験, 相対変位 10 mm	375	379	350	362	415	445	■

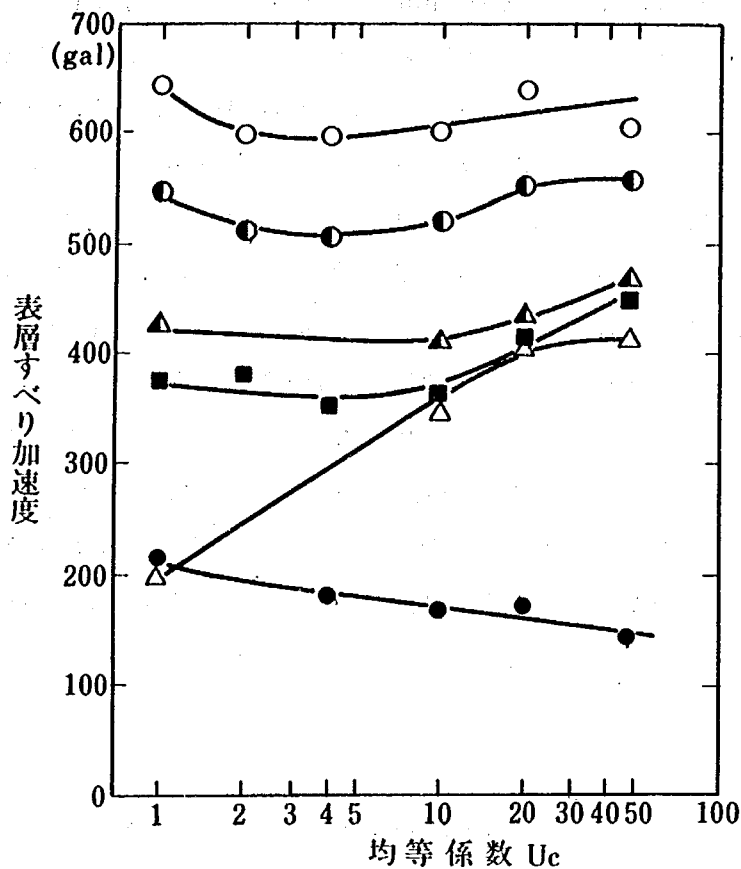


図- 5. 16 均等係数と表層すべり加速度

5.3 堤体密度の差の影響

堤体密度の差による表層すべり加速度の大きさを検討するために、相対密度 40 %，80 %，100 % の要素モデルを作製して実験した。

図- 5. 17 は均等係数が 1，20，48 において密度が異なる場合の加振加速度と相対変位量との関係を示したものである。表- 5. 13 に各粒度毎の密度および相対変位が 5，10，20 mm のときの表層すべり加速度を示す。

図- 5. 18 は要素モデルの相対密度と相対変位 10 mm および 20 mm における表層すべり加速度との関係を均等係数が 1 と 20 で比較したものである。均等係数の大小に関係なく相対密度が高くなると表層すべり加速度は増える傾向にある。相対密度 40 % の要素モデルの表層すべり加速度は相対密度 100 % の要素モデルの表層すべり加速度の 70 ~ 80 % である。密度がかなり小さくなったとは言え表層すべり加速度はあまり落ちないことを示している。

図- 5. 19 は、横軸に間隙比をとり、縦軸に相対変位 10 mm および 20 mm の表層すべり加速度を示したものである。均等係数が大きい場合は最大間隙比と最小間隙比の範囲が狭いこともあるが、わずかな間隙比の違いによって表層すべり加速度がかなり異なることを示している。

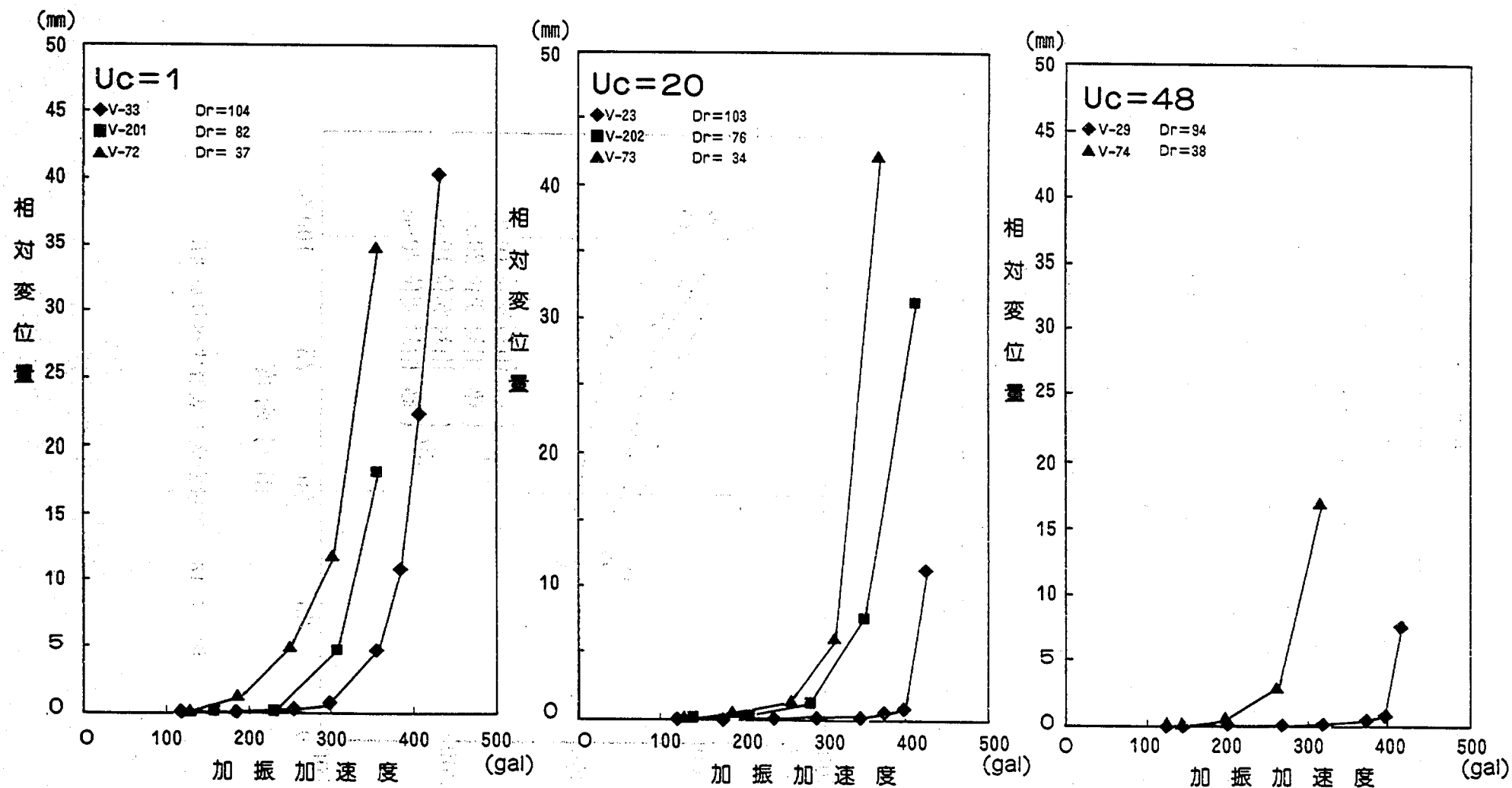


図-5.17 相対密度が異なる場合の相対変位量と表層すべり加速度

表- 5. 13 相対変位量が 5, 10, 20 mm のときの表層すべり加速度

均等係数	試験番号	乾燥密度 ρ_d	間 隙 比 e	相対密度 Dr	表 層 す べ り 加 速 度		
					相対変位 5 mm	相対変位 10 mm	相対変位 20 mm
Uc = 1 (単一粒径)	V- 72	$\frac{t}{m^3}$ 1.471	0.80	37 %	252 gal	290 gal	325 gal
	V- 201	1.575	0.68	82	308	328	(365)
	V- 33	1.619	0.64	104	358	383	407
Uc = 20	V- 73	1.893	0.40	34	304	323	339
	V- 202	1.955	0.36	76	325	358	387
	V- 23	1.997	0.33	103	412	425	(435)
Uc = 48	V- 74	1.974	0.34	38	270	290	(324)
	V- 29	2.109	0.26	94	408	(418)	(430)

() 内は推定値

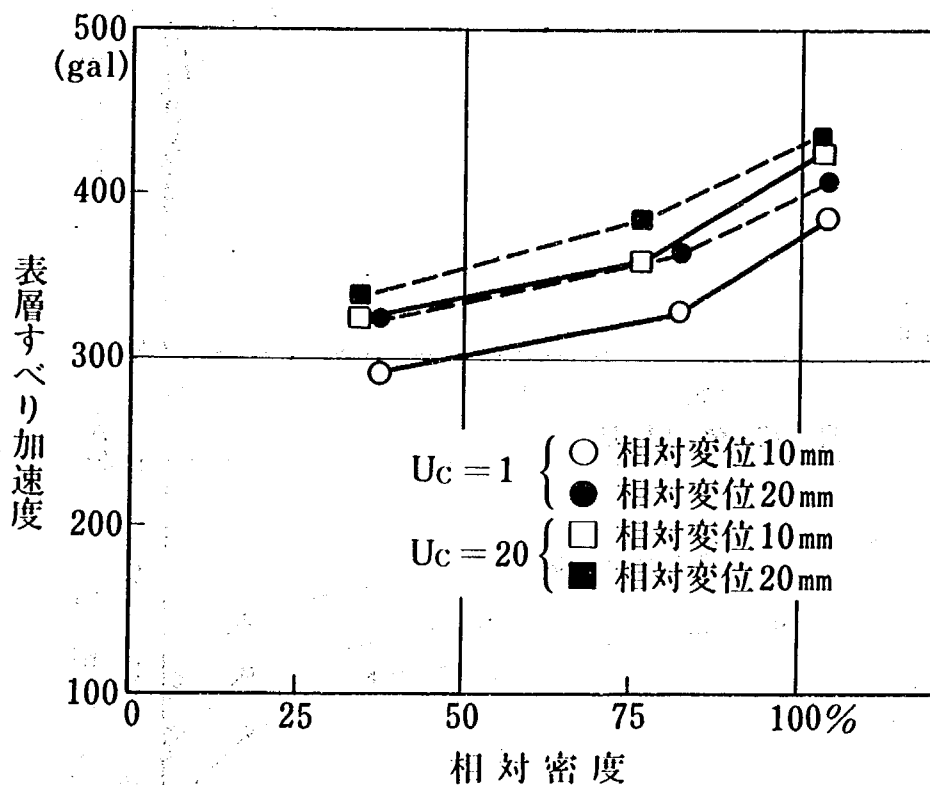


図- 5. 18 相対密度と表層すべり加速度

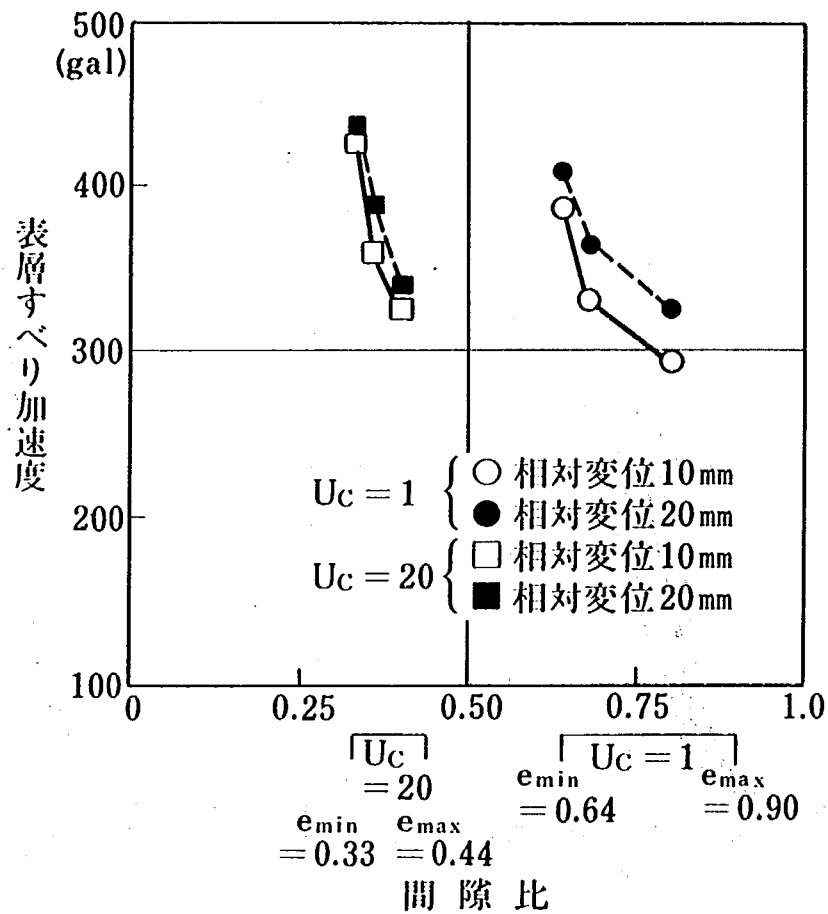
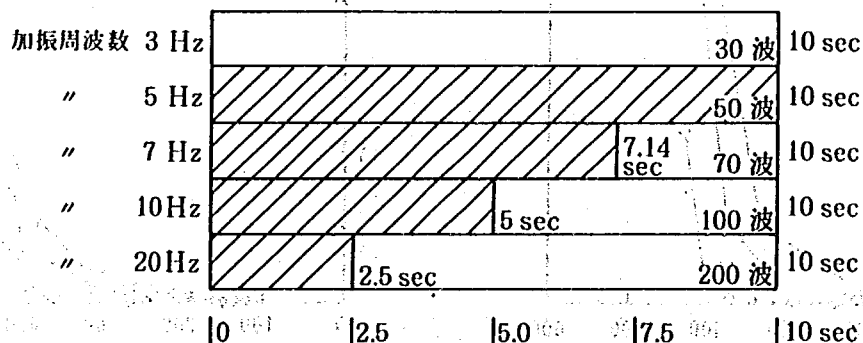


図- 5. 19 間隙比と表層すべり加速度

5. 4 加振周波数の影響

表層すべり加速度の加振周波数による影響について 3 Hz ~ 20 Hz の周波数範囲で検討した。実験は、図- 5. 20 に示すように①加振時間を 10 秒間と一定にした場合と、②加振波数を 50 波と一定とした場合の 2 通りを行った。図- 5. 21 は各々の均等係数毎の加振加速度と相対変位量との関係を示したものである。表- 5. 14, 表- 5. 15 に加振時間が一定の場合と加振波数が一定の場合の相対変位が 5, 10, 20 mm の表層すべり加速度を示す。この値は図- 5. 21 から読み取った値である。



白抜き：加振時間一定 斜線部：加振波数一定

図- 5. 20 加振周波数の与え方

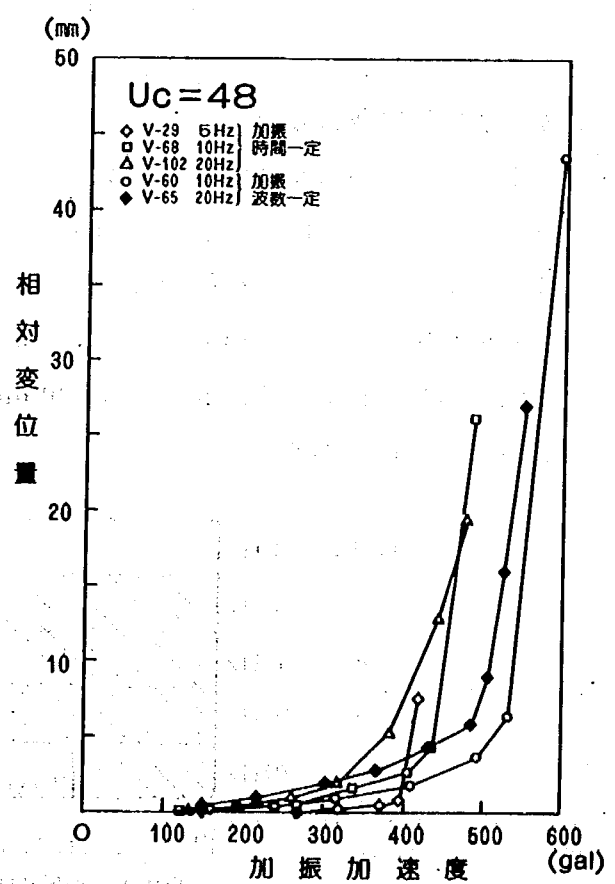
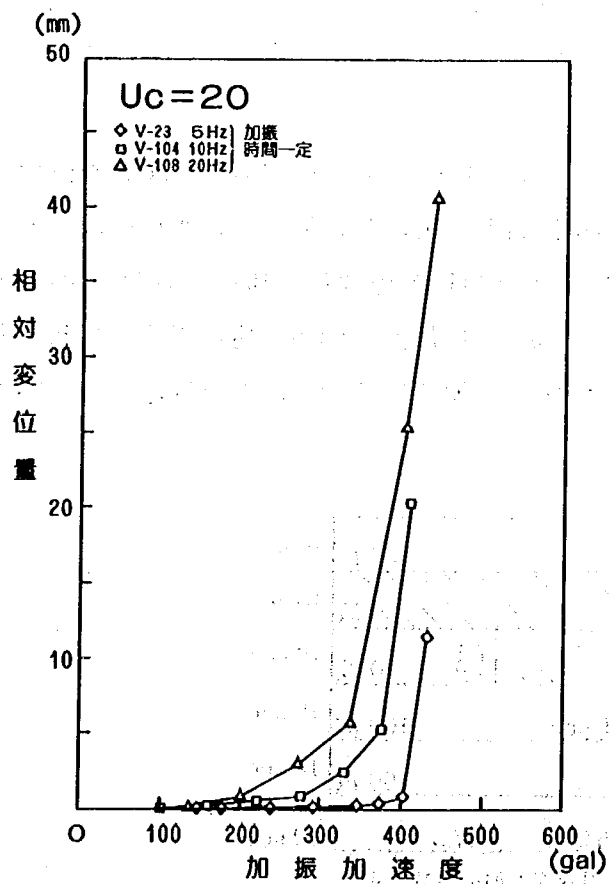
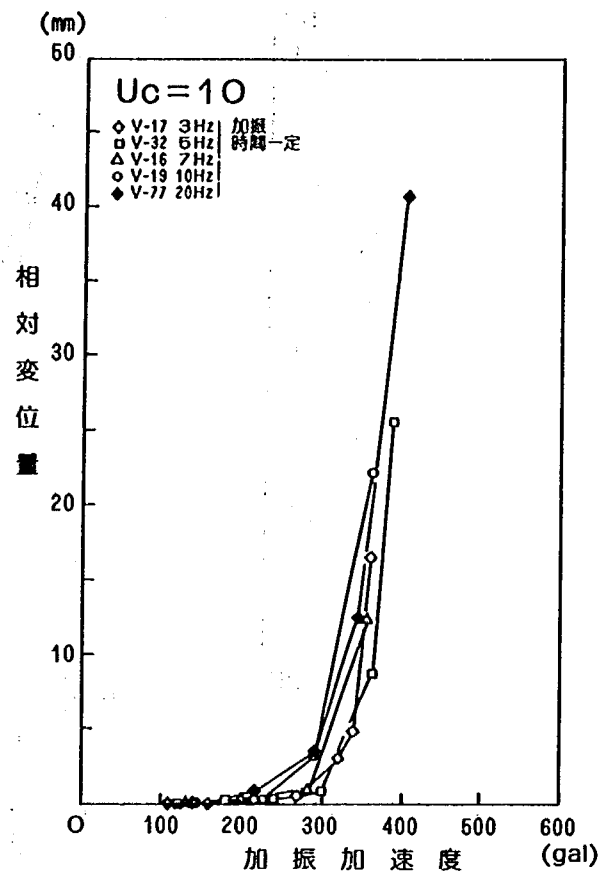
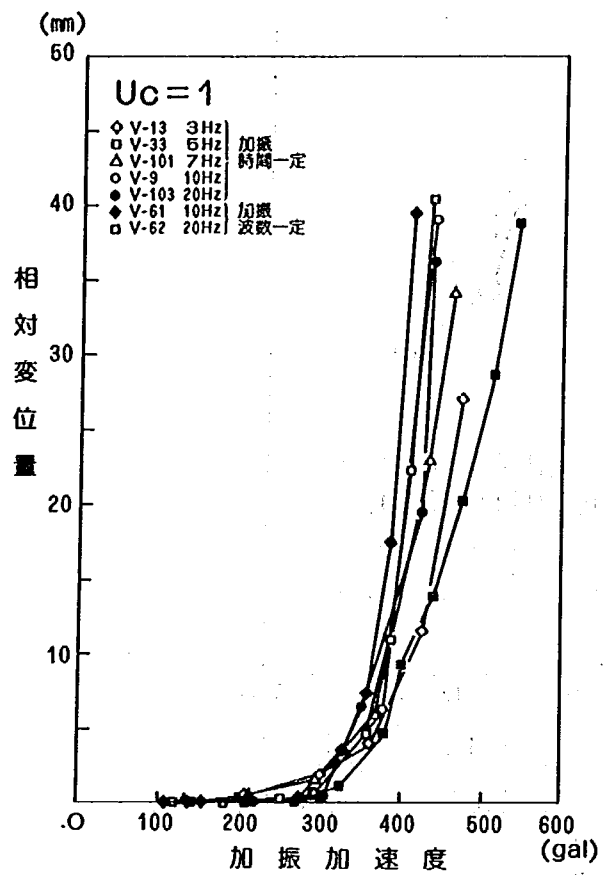


図 - 5.21 加振加速度と相対変位量との関係

表-5.14 加振時間が一定の場合の表層すべり加速度

均等係数	周波数 Hz	試験番号	乾燥密度 $\rho_d \text{ t/m}^3$	間隙比 e	相対密度 Dr %	表層すべり加速度 gal		
						相対変位 5 mm	相対変位 10 mm	相対変位 20 mm
Uc = 1	3	V-11	1.637	0.62	107	314	349	377
		V-13	1.609	0.65	96	341	367	392
		V-27	1.629	0.63	103	367	388	412
		平均	1.625	0.63	102	341	368	393
	7	V-101	1.613	0.64	97	355	385	425
	10	V-9	1.636	0.62	106	359	385	405
		V-12	1.636	0.62	106	295	332	355
		平均	1.636	0.62	106	327	359	380
	20	V-103	1.614	0.64	98	340	373	428
Uc = 10	3	V-17	1.894	0.40	105	338	347	(363)
	7	V-16	1.864	0.42	92	308	341	(368)
	10	V-63	1.883	0.41	100	345	361	392
		V-19	1.873	0.42	96	297	314	(354)
		V-15	1.870	0.42	95	293	305	329
		平均	1.875	0.42	97	312	327	358
	20	V-77	1.892	0.40	104	300	330	361
		V-64	1.879	0.41	99	287	359	405
		V-14	1.885	0.41	101	293	312	(346)
		平均	1.885	0.41	101	293	334	371
Uc = 20	10	V-69	1.988	0.33	97	350	369	(404)
		V-104	1.991	0.33	99	368	385	407
		平均	1.990	0.33	98	359	377	406
	20	V-70	1.993	0.33	101	384	450	461
		V-108	1.991	0.33	99	318	352	380
		平均	1.992	0.33	100	351	401	421
Uc = 48	10	V-68	2.123	0.25	99	436	447	472
	20	V-102	2.123	0.25	99	377	418	478

() 内は推定加速度

表-5.15 加振周波数が一定の場合の表層すべり加速度

均等係数	周波数 Hz	波数	試験番号	乾燥密度 $\rho_d \text{ t/m}^3$	間隙比 e	相対密度 Dr %	表層すべり加速度 gal		
							相対変位 5 mm	相対変位 10 mm	相対変位 20 mm
Uc = 1	10	50	V-61	1.614	0.64	98	369	414	454
			V-107	1.611	0.65	97	358	397	452
			平均	1.613	0.65	98	364	406	453
	20	50	V-62	1.629	0.63	103	381	407	475
Uc = 48	10	50	V-60	2.127	0.25	100	510	(536)	(552)
	20	50	V-65	2.114	0.25	95	454	508	535

() 内は推定加速度

図- 5. 22 は横軸に加振周波数を，縦軸に相対変位 10 mm における表層すべり加速度をとり，加振時間一定で加振周波数の依存性について検討したものである。加振時間が一定であれば均等係数によらず加振周波数が高くなっても表層すべり加速度はほぼ同じ大きさを示し，周波数の依存性は少ない。図- 5. 23 は，加振周波数一定（50 波）のときの加振時間と相対変位量が 10 mm のときの表層すべり加速度との関係を示したものである。加振時間が長くなれば表層すべり加速度は小さくなることを示している。いいかえれば，加振周波数が一定であれば加振周波数が低いほど表層すべり加速度は小さくなり周波数の依存性があると言える。

この理由として振動台の加振エネルギーに起因しているものと考えられる。振動台の加振エネルギーは次式によって示すことができる。

1 秒当りの加振平均エネルギー

$$E_0 = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \frac{1}{2} m v^2 dt = \frac{1}{4} m y_0 (2 \pi f)^2 = \frac{1}{4} m y_0 \alpha$$

T_0 : 周期 m : 質量 v : 振動台の速度 ($v = y_0 \cos 2 \pi f t$) y_0 : 振幅
 f : 周波数 α : 加速度

t_0 秒間の加振エネルギーの総和

$$E = E_0 \times t_0 = \frac{1}{4} m y_0 \alpha t_0$$

つまり，加振時間が一定であれば振動台の加振エネルギーの総和は，周波数に関係なく一定となるため，加振時間が一定であれば周波数に依存しないと言える。

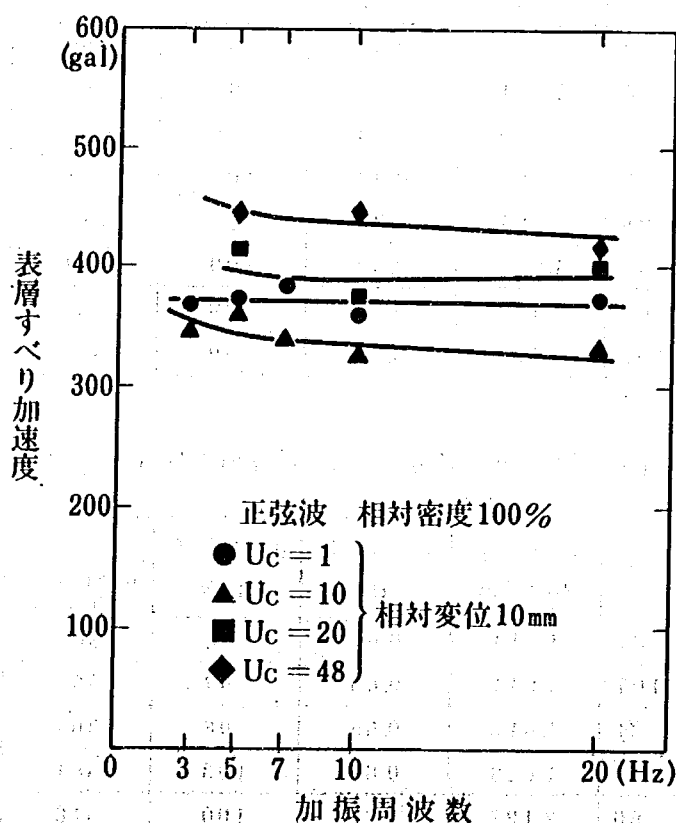


図- 5. 22 加振時間一定における加振周波数と表層すべり加速度

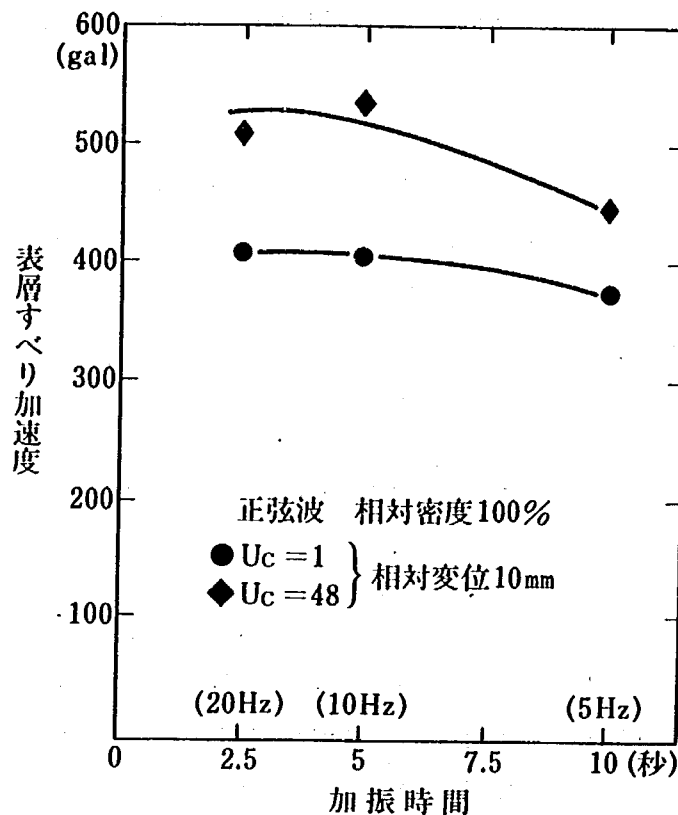


図- 5. 23 加振波数(50 波)のときの加振時間と表層すべり加速度

5. 5 加振継続時間の影響

要素モデルにおける加振継続時間と表層の変位量との関係を均等係数 1 および 20 の要素モデルで検討した。表- 5. 16 は各々の加振加速度後の相対変位量と密度について示したものである。図- 5. 24 は横軸に加振継続時間を取り、縦軸に相対変位量を示し加振加速度をパラメータにしてプロットしたものである。1 回当りの加振時間は 10 秒間である。200 gal の加振加速度では均等係数 1 および 20 の要素モデルとも加振継続時間 100 秒を与えても要素モデルの変位量はあまりない。それ以上の加振加速度になると、相対変位量は増えるが 1 回の加振時間 10 秒で要素モデルの動きがほとんど決まり、更に加振時間を加えても相対変位量は増えない。しかし、均等係数 20 の要素モデルでは加振加速度が 400 gal になると相対変位量はだんだんと増えていく。すなわち、均等係数 20 の要素モデルでは加振加速度 400 gal が要素モデルの破壊加速度に相当すると考えられる。加振継続時間が増えても相対変位量が増えない理由としては、材料の摩擦抵抗がすべりを生じさせる慣性力より大きいためである。いいかえると破壊を生じさせない加振加速度においては加振継続時間の影響はないと言える。

ちなみに各々の加振加速度毎に要素モデルの密度変化を図- 5. 25 に示したが要素モデルが破壊を示さないために要素モデルの密度のゆるみはあまり認められない。

表-5.16 繰り返し加振後の相対変位量および密度

200 gal 加振

繰り返し回数および 加振継続時間		初期	1 回 10 秒	2 20	3 30	4 40	5 50	6 60	7 70	8 80	9 90	10 100
Uc = 1 198gal v-37	相対変位	mm 0	0.12	0.17	0.24	0.24	0.26	0.33	0.33	0.38	0.38	0.37
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.628	1.638	1.627	1.629	1.705	1.641	1.636	1.623	—	—	1.664
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	101	100	100	105	101	101	100	—	—	102
Uc = 20 190gal v-43	相対変位	mm 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	密 度 ρ_d	t/m ³ 2.007	—	—	2.003	—	—	2.027	—	—	—	2.018
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	—	—	100	—	—	101	—	—	—	101

注) 密度の変化率: n 回加振後の密度を初期の密度で割った値

300 gal 加振

繰り返し回数および 加振継続時間		初期	1 回 10 秒	2 20	3 30	4 40	5 50	6 60	7 70	8 80	9 90	10 100
Uc = 1 301gal v-40	相対変位	mm 0	1.30	1.45	1.48	1.39	1.40	1.45	1.43	1.41	1.42	1.43
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.643	1.624	1.632	1.635	1.632	1.665	—	1.622	—	—	1.638
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	99	99	100	99	101	—	99	—	—	100
Uc = 20 318gal v-45	相対変位	mm 0	0.98	1.50	1.65	1.73	1.82	1.93	2.03	2.01	2.04	2.14
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.998	1.999	2.005	1.995	1.987	2.014	—	2.003	—	—	2.037
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	100	100	100	99	101	—	100	—	—	102

350 gal 加振

繰り返し回数および 加振継続時間		初期	1 回 10 秒	2 20	3 30	4 40	5 50	6 60	7 70	8 80	9 90	10 100
Uc = 1 354gal v-38	相対変位	mm 0	7.76	8.90	8.97	9.03	8.94	8.93	9.00	9.01	8.97	—
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.664	1.630	1.618	1.613	—	—	—	1.618	—	—	1.620
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	98	97	—	—	—	—	97	—	—	97
Uc = 20 359gal v-47	相対変位	mm 0	3.25	3.84	4.25	4.50	4.79	4.91	5.14	5.21	5.40	5.46
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.996	1.969	1.989	1.992	—	—	—	2.021	—	—	1.997
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	99	100	100	—	—	—	101	—	—	100

400 gal 加振

繰り返し回数および 加振継続時間		初期	1 回 10 秒	2 20	3 30	4 40	5 50	6 60	7 70	8 80	9 90	10 100
Uc = 1 397gal v-42	相対変位	mm 0	9.07	11.85	12.78	13.02	13.56	13.69	13.92	14.20	14.51	14.76
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.663	1.633	1.601	1.622	—	—	—	1.627	—	—	1.626
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	98	96	98	—	—	—	98	—	—	98
Uc = 20 391gal v-	相対変位	mm 0	6.11	8.64	18.54	26.98	—	—	—	—	—	—
	密 度 ρ_d	t/m ³ 1.997	2.018	2.007	1.952	1.947	—	—	—	—	—	—
	密 度 の 変 化 の 率	% 100	95	—	—	—	—	—	—	—	—	—

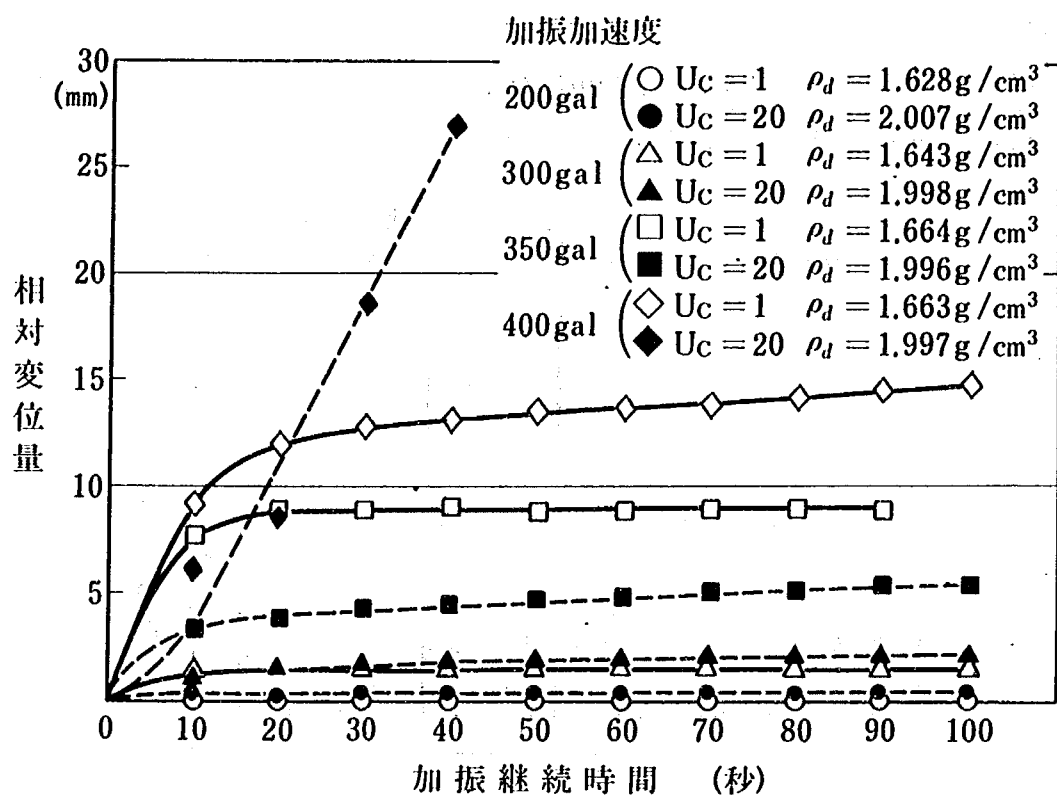


図-5.24 加振継続時間と相対変位量の関係

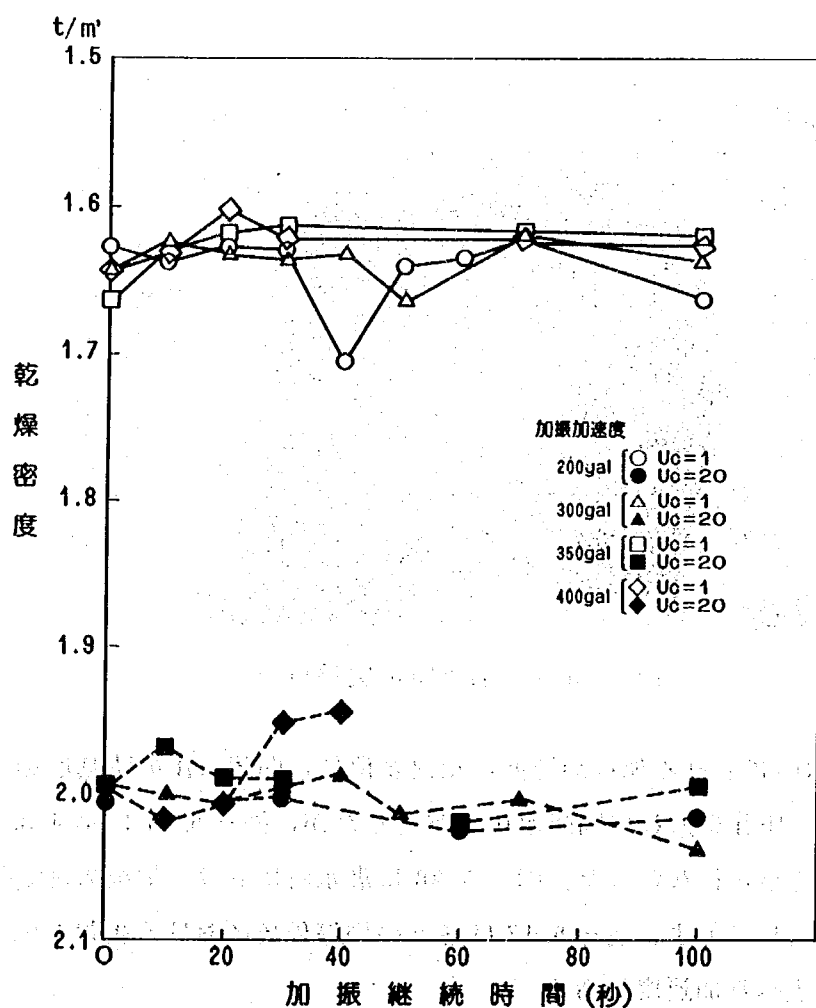
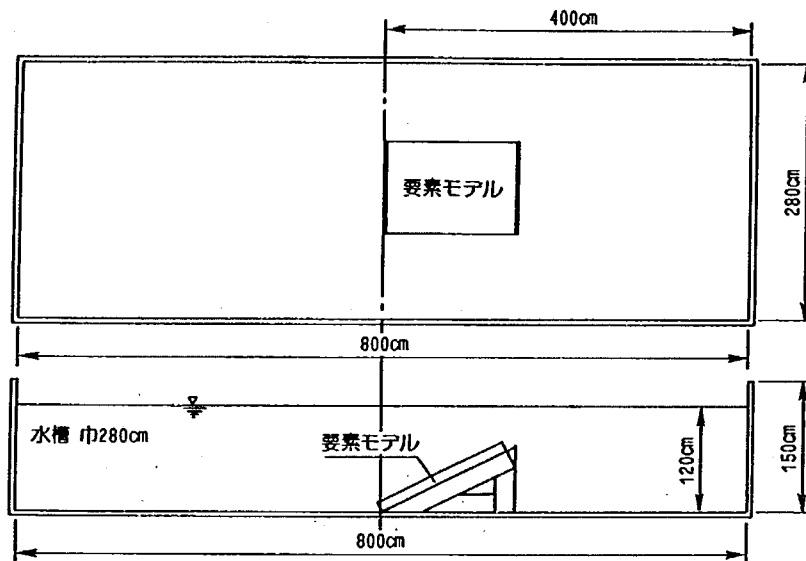


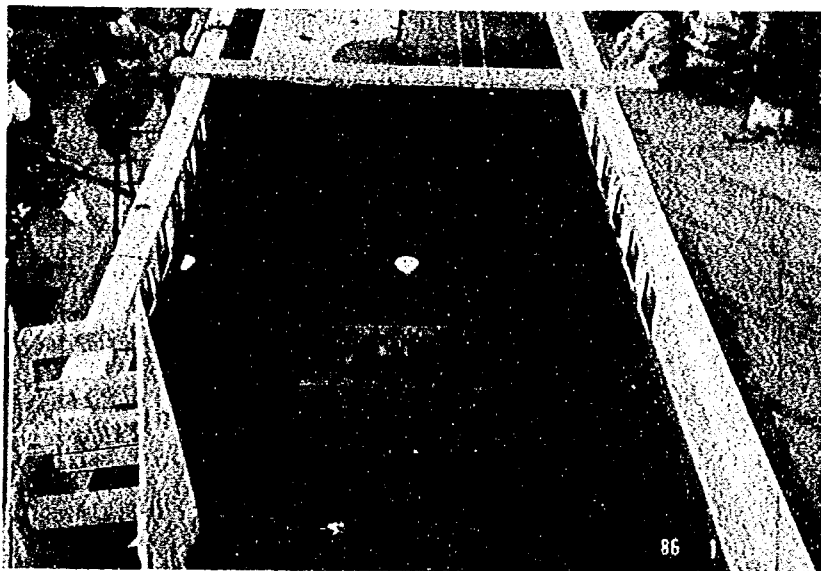
図-5.25 加振継続時間と要素モデル密度の変化

5.6 湛水の有無

実験は、大きさ $8 \times 2.8 \times 1.5$ m の水槽中に要素モデルを入れて行った（図－ 5. 26，写真－ 5. 3）。要素モデルの水浸時間は約 43 時間である。



図－ 5. 26 湛水時の要素モデルの配置



写真－ 5. 3 湛水時の実験概要

図－ 5. 27 に湛水時における加振加速度，相対変位量，間隙水圧の時刻歴の一例を示す。要素モデル中に間隙水圧計を入れて間隙水圧を測定したが，図－ 5. 27 に示すように加振前後で間隙水圧の変化が認められなかった。図－ 5. 28 に湛水時における加振加速度と相対変位量との関係を空虚時と比較して示す。表－ 5. 17 は各々の均等係数における相対変位が 5，10，20 mm における表層すべり加速度である。

1000GAL
50.00MM
100.0CM
100.0CM

加速度・相対変位・間隙水圧

-1000
-50.00
0.000
0.000

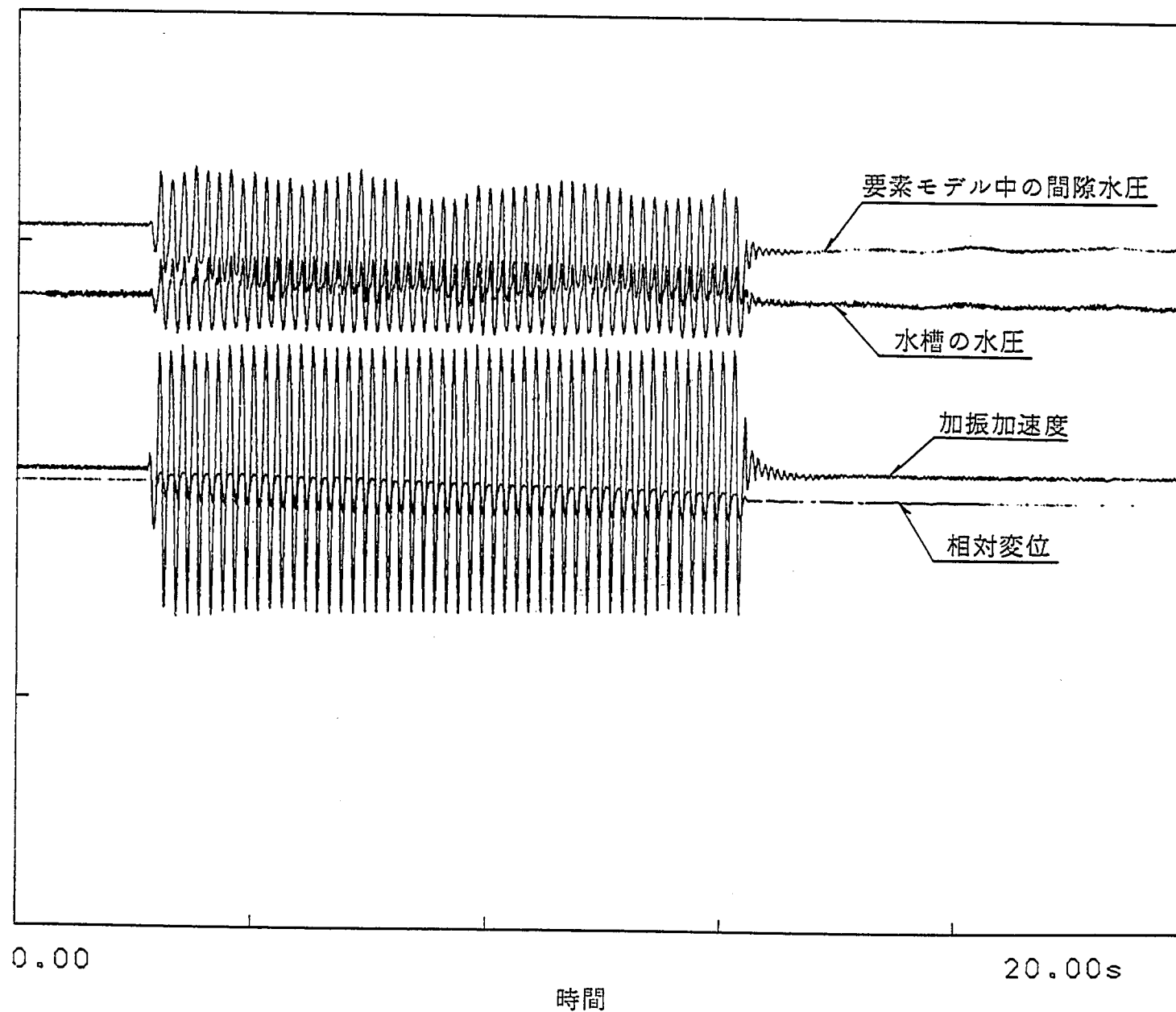


図-5.27 加振加速度，相対変位，間隙水圧の時刻歴の一例 ($U_c=20$)

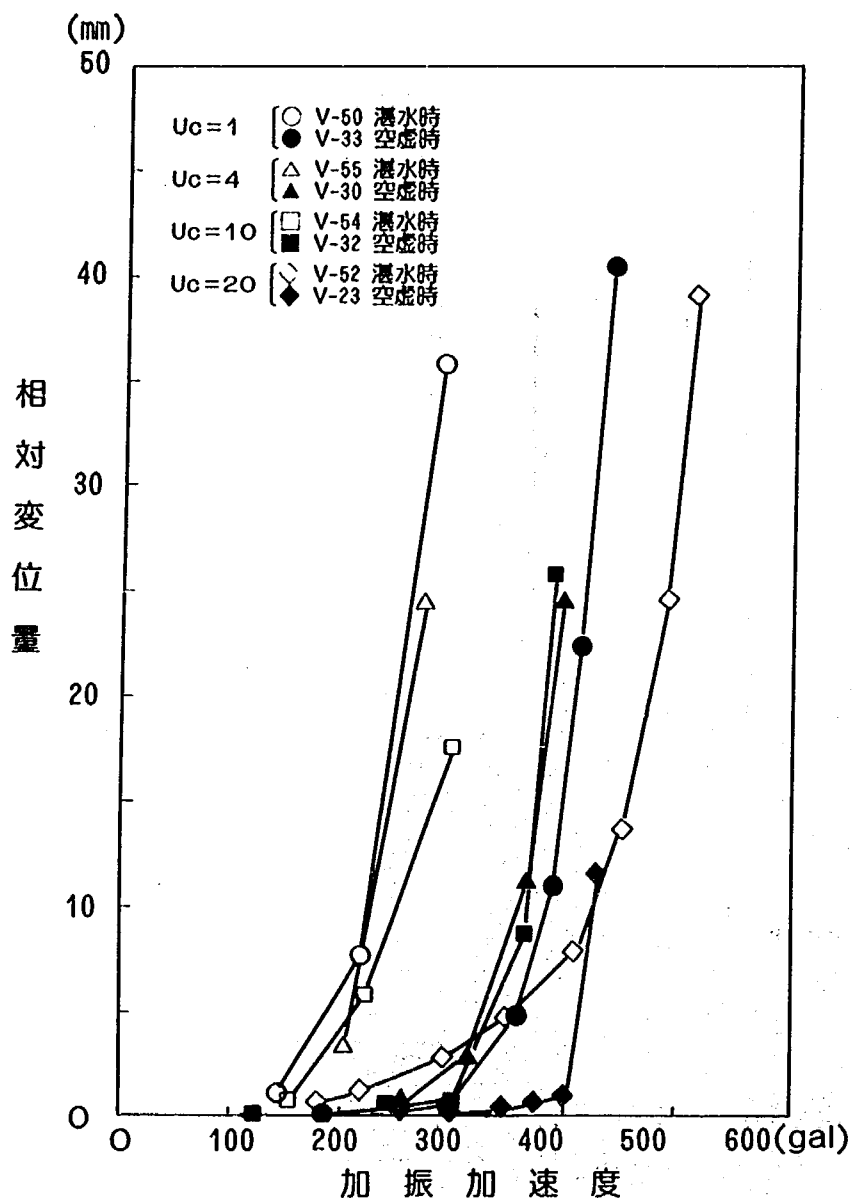


図-5.28 加振度振巾と相対変位量との関係

表-5.17 湛水時の表層すべり加速度

均等係数	試験番号	乾燥密度 $\rho_d \text{ t/m}^3$	間隙比 e	相対密度 Dr %	表層すべり加速度 gal		
					相対変位 5 mm	相対変位 10 mm	相対変位 20 mm
Uc = 1	V - 50	1.610	0.647	96	186	(221)	(246)
	V - 51	1.475	0.797	38	150	161	187
Uc = 4	V - 55	1.767	0.500	100	206	224	256
Uc = 10	V - 54	1.867	0.420	94	210	248	(302)
Uc = 20	V - 52	1.988	0.334	97	354	425	476
	注1) V - 100	1.991	0.331	99	424	467	508
	V-52, V-100 の平均	1.990	0.333	98	389	446	492
	V - 53	1.899	0.396	39	320	393	445

注1) 水没時間 504時間
()内は推定加速度

図-5.29は、湛水時における均等係数と相対変位が5, 10, 20 mmのときの表層すべり加速度との関係を空虚時と比較したものである。湛水時には均等係数10までの要素モデルの表層すべり加速度は、空虚時の表層すべり加速度の6~7割である。これは、馬場⁷⁾が単一粒径で行った研究結果と一致する。しかし、均等係数20の要素モデルの表層すべり加速度は、空虚時と変わらないばかりか、むしろ相対変位量が10 mmになると空虚時よりも大きくなる。

湛水時の静的安息角を表-5.10に示したが、空虚時とほぼ同じ値である。湛水時の静的安息角から(3)式により湛水時の表層すべり加速度(α_w)を求めて図-5.29に示す。(3)式は(1)式と同様に湛水時の無限斜面の地震時すべりから求めたものである。

$$\alpha_w = \frac{\gamma_{\text{sub}}}{\gamma_{\text{sat}}} \cdot \tan(\phi - \theta) \cdot g \quad \dots\dots\dots(3)$$

γ_{sub} : 水中単位重量 tf/m³

γ_{sat} : 飽和 " tf/m³

この結果は、空虚時の要素モデル実験における均等係数と表層すべり加速度との結果と異なり、均等係数が増えても湛水時の表層すべり加速度は増加しない。

また、湛水時において相対密度40%のケースについても実験した。図-5.30に示すように、湛水時には、相対密度40%の相対変位5, 10, 20 mmの表層すべり加速度は均等係数が1の要素モデルでは相対密度100%の表層すべり加速度の約7~8割でしかも空虚時の値と変らない。均等係数20の要素モデルでは湛水時には相対密度100%の表層すべり加速度の約9割となり、湛水時には相対密度が小さくなっても表層すべり加速度はあまり減少しないことを示している。

すなわち、均等係数が大きい場合($U_c = 20$)には湛水時において要素モデルの密度が小さくなっても振動に強いことを示している。

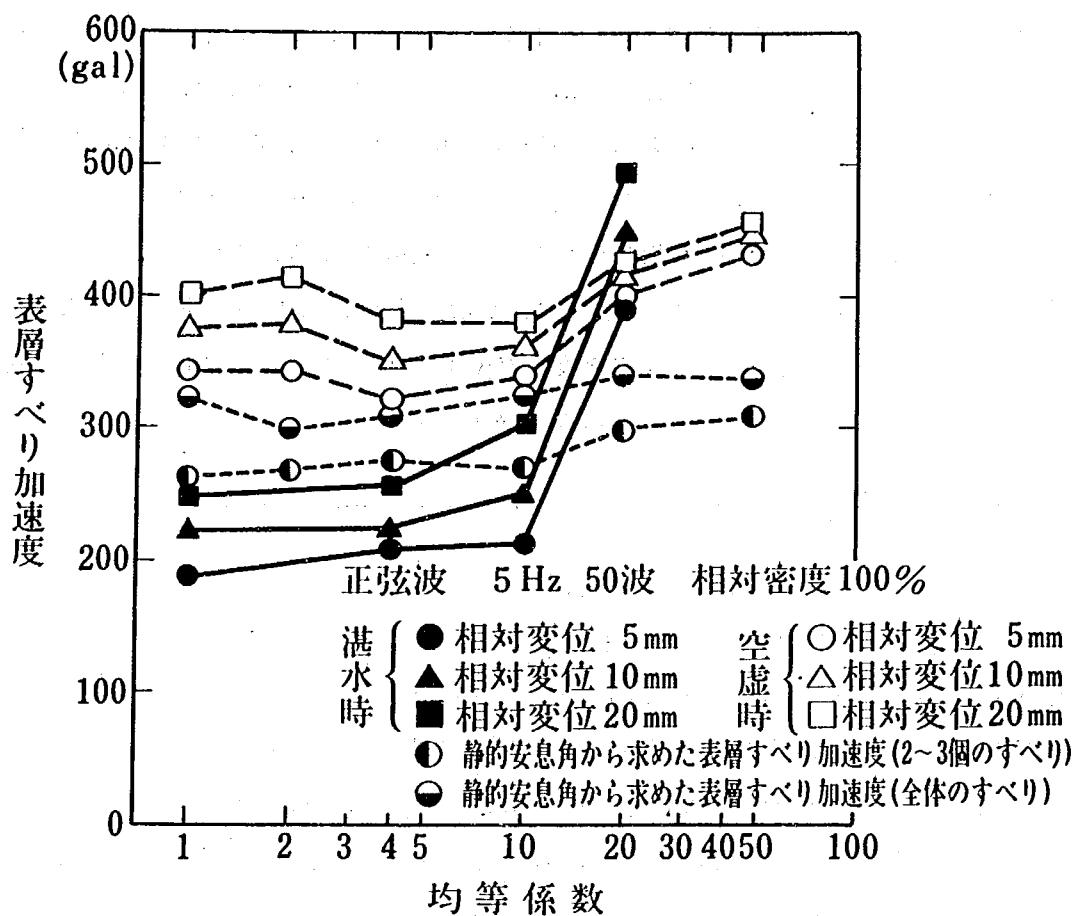


図- 5. 29 均等係数と表層すべり加速度

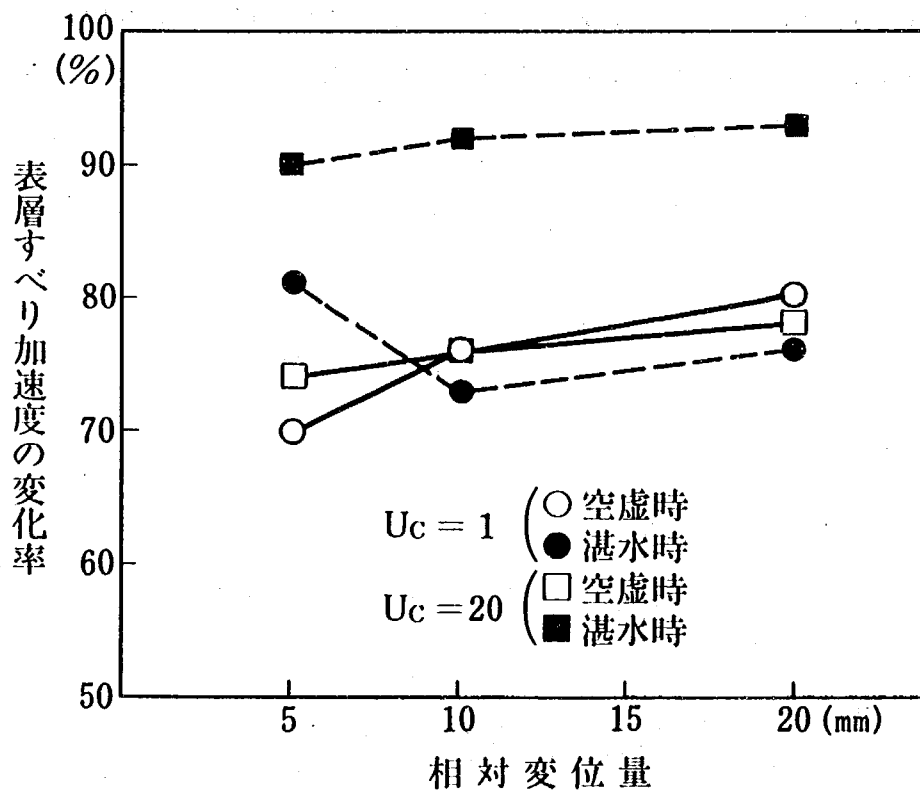


図- 5. 30 表層すべり加速度の変化率
(空虚時と満水時の比較)

6. ま と め

1) 材料の最大粒径と表層すべり加速度との相関は強く粒径が大きくなれば、表層すべり加速度は大きくなる。低側圧 ($\sigma_3 = 0.3 \text{ kgf/cm}^2$) の三軸圧縮試験から得られた内部摩擦角および静的安息角は、粒径が大きいほど大きく、振動台上の斜面要素モデルの定性的な傾向と一致している。

2) 表層すべりにおける均等係数の大小は、破壊パターンに影響する。均等係数が大きい場合は破壊が一気に進行するが、均等係数が小さい場合は徐々に破壊が生じていく。また、表層すべり加速度と材料の均等係数との関係については、均等係数 10 以下では均等係数の影響は小さく、10 以上になると表層すべり加速度は大きくなるようである。しかし、相対変位量を大きくとった場合の表層すべり加速度は、均等係数の影響が少ない。

均等係数と表層すべり加速度との関係は、材料の自然落下によらない方法で求めた静的安息角および粘着力成分がゼロである低側圧 (0.5 kgf/cm^2) の内部摩擦角と定性的に対応している。

3) 相対密度および間隙比と表層すべり加速度との相関は強く、相対密度が小さく、間隙比が大きくなれば表層すべり加速度は小さくなる。

4) 加振周波数を変えて加振時間を一定にとれば、表層すべり加速度は加振周波数の依存性が少ない。しかし加振波数が一定の場合は、加振周波数が高くなれば表層すべり加速度は大きくなる。

5) 破壊を生じさせない加振加速度であれば、加振継続時間がいくら増えても相対変位が増えず破壊は生じない。すなわち、堤体の破壊には材料の摩擦抵抗を上回る加速度が必要であることを示している。

6) 湛水することによって、表層すべり加速度は、均等係数 20 の場合を除き空虚時の表層すべり加速度の 6 ～ 7 割程度となる。ただし、均等係数 20 の場合の表層すべり加速度は空虚時より大きくなる。

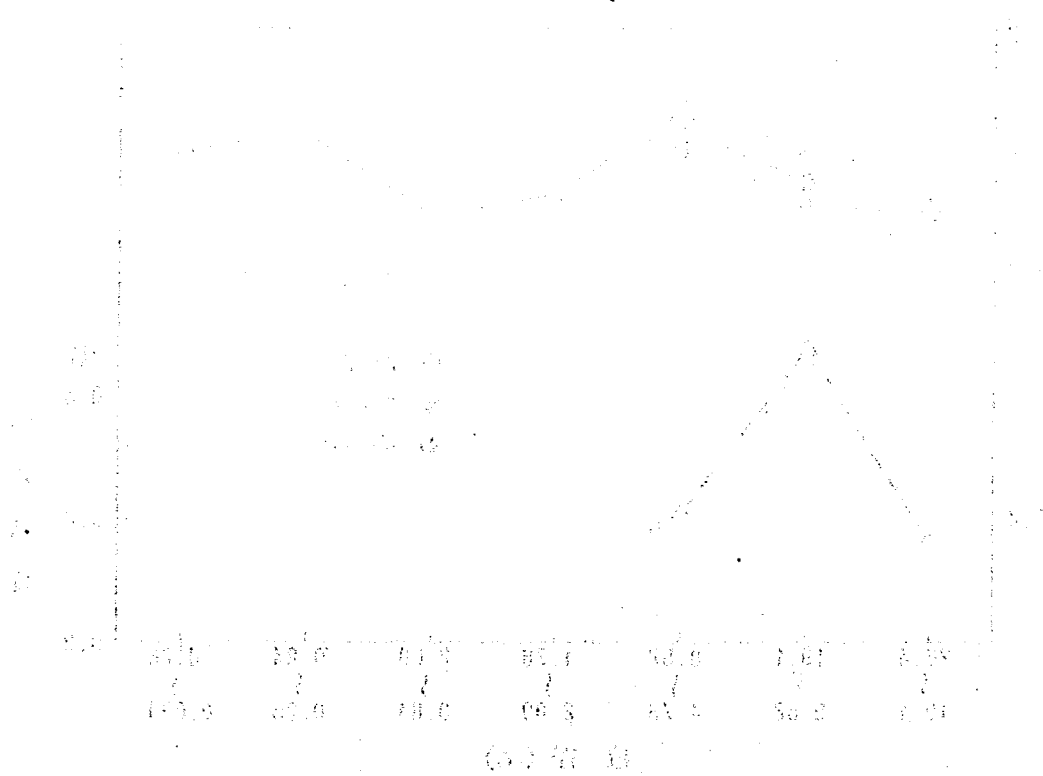
また、湛水時において相対密度が小さくなくても均等係数 20 の場合は、表層すべり加速度の減少率が、空虚時に比べかなり小さい。

7. 参考文献

- 1) 松本徳久, 豊田光雄, 志賀三智: ロックフィルダムの模型振動実験, 土木技術資料, 1983.6
- 2) 田村重四郎, 岡本舜三, 加藤勝行: ロックフィルダム模型の振動破壊試験-貯水のない場合, 土と基礎, 土質工学会, 1972.5
- 3) 建部英博, 大根義男: 低拘束圧時におけるロック材のせん断強度について, 土木学会中部支部報告, 土木学会, S 54 年
- 4) 建部英博, 大根義男: 大型模型によるロックフィルダムの振動挙動について, 第 15 回土質工学研究発表会, 土質工学会
- 5) 建設省土木研究所フィルダム研究室: 昭和 52 年度河川総合開発事業調査報告書
- 6) 建設省土木研究所フィルダム研究室: 昭和 51 年度河川総合開発事業調査報告書
- 7) 馬場恭平: フィルダム材料の動的性質について, ダム日本, 1977.3
- 8) 長野ダム動的構造模型実験: 電源開発K.K 土木試験報告, 1965
- 9) 渡辺啓行: 模型振動実験からみたフィルダムの動特性, 土と基礎, 土質工学会, 1980.5
- 10) 岡本舜三, 田村重四郎: ロックフィルダムの安定性-特に地震時安定について-, 大ダム第 53 号, 1970.9
- 11) 高瀬川電源開発工事報告書: 東京電力株式会社, 1981
- 12) N. O. Marachi, C. K. Chan, H. B. Seed: Strength and Deformation Characteristics of Rokfill Materials, Report N. TE-69-5, U. C. Berkeley, 1969
- 13) 松本徳久, 渡辺和夫, 村上清基: ロック材料の最大粒径と三軸圧縮強度, 土木技術資料, Vol 25, No 12, 1983
- 14) 大本家正ほか: 粗粒材料の三軸試験における最大粒径の影響について, 第 38 回建設省技術研究会河川部門自由課題, 1984

8. 参 考 資 料

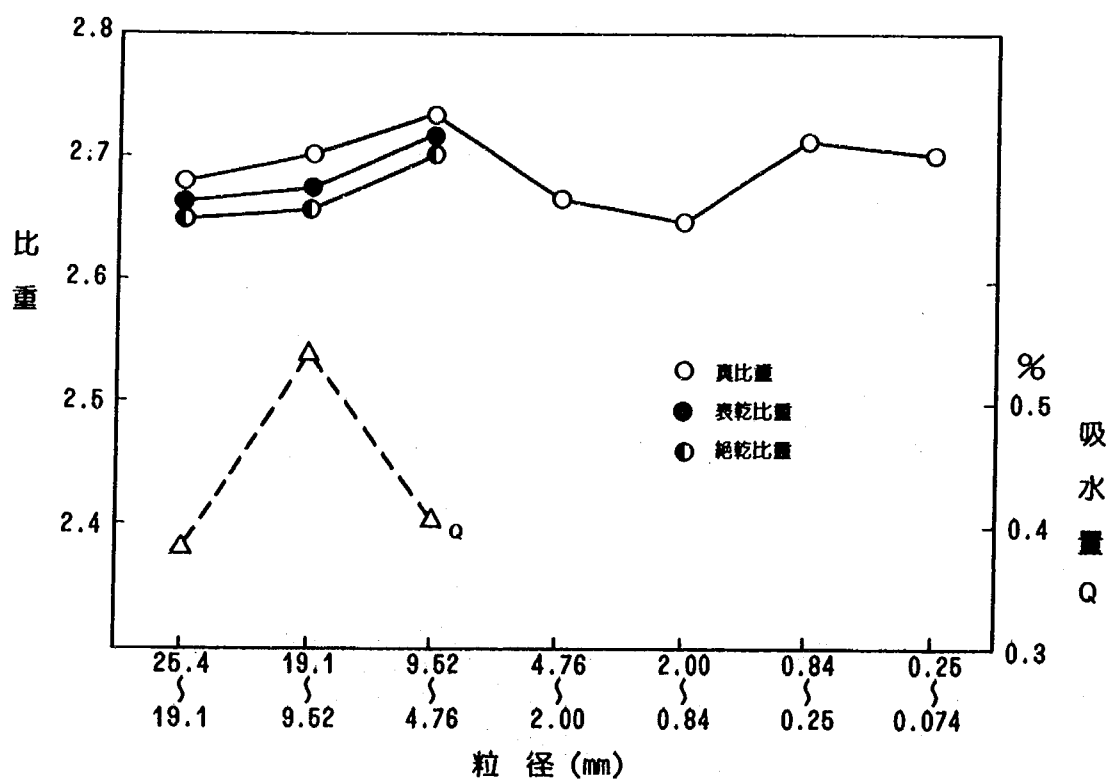
1. 比重・吸水量（碎石）
2. 最大粒径を変えた低拘束圧の三軸圧縮試験
3. 粒度を変えた低拘束圧の三軸圧縮試験
4. 土槽の振動特性



1. 砕石の比重・吸水量

砕石（石岡産）の比重

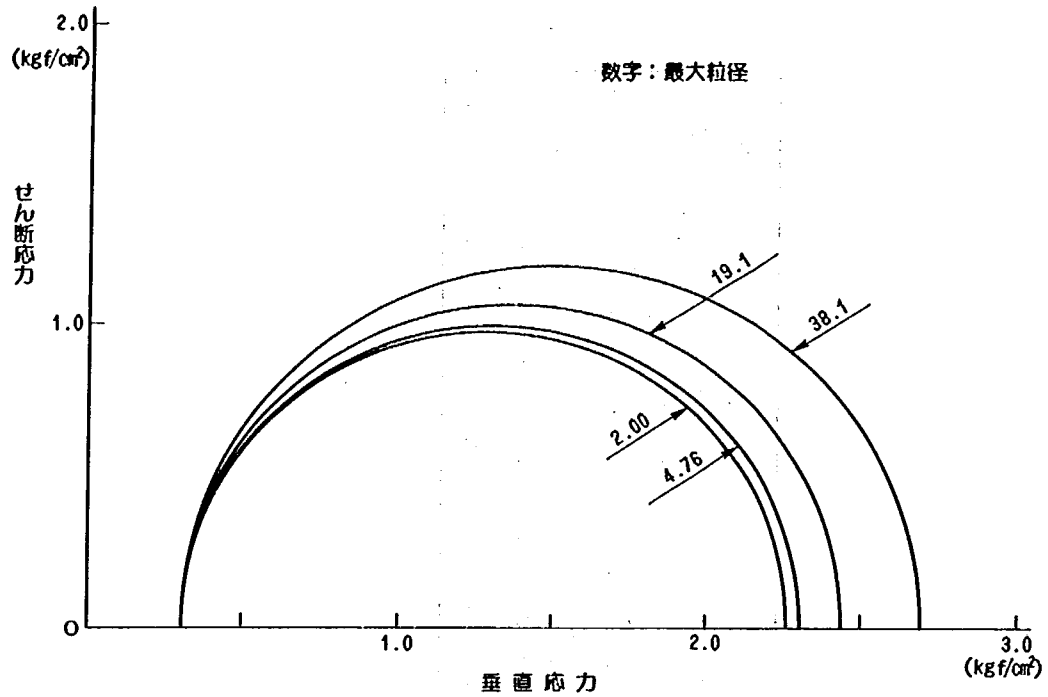
粒径	真比重	絶乾比重	表乾比重	吸水率
25.4 - 19.1 ^{mm}	2.679	2.651	2.662	0.384
19.1 - 9.52	2.700	2.658	2.673	0.538
9.52 - 4.76	2.735	2.705	2.716	0.403
4.76 - 2.00	2.668			
2.00 - 0.84	2.648			
0.84 - 0.25	2.714			
0.25 - 0.074	2.705			



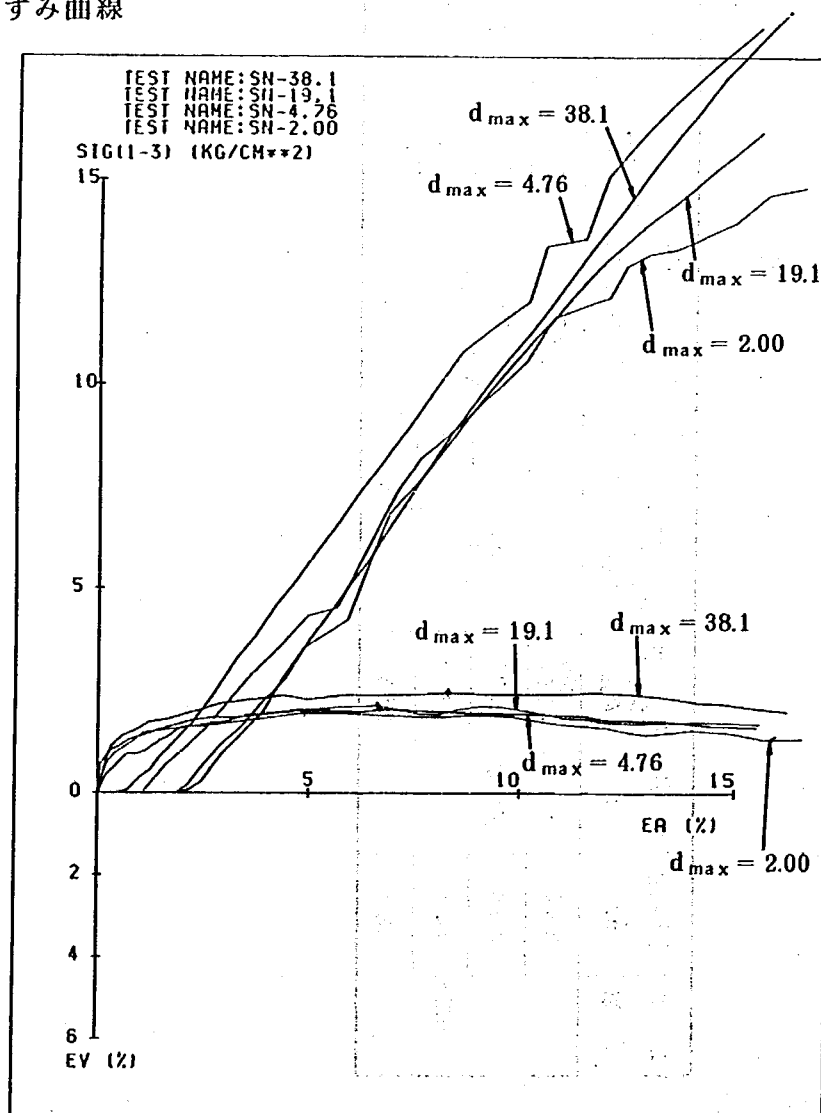
a) 試験結果一覧表

均等 係数	最大粒径 mm	側圧 σ_3	初期 乾燥密度 ρ_{d0}	平均 乾燥密度 ρ_{d0}	間隙比の変化				破 壊 時						ϕ_0 ピーク時 内部摩擦角	ϕ_{15} 15%ひずみ 内部摩擦角
					e_0	$\bar{e}_0$	e_c	$\bar{e}_c$	$\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)_{\max}}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}}$	ε_f %	$\Delta V/V$	E	ν	σ_1/σ_3		
1 単一粒径	2.00	kgf/cm ² 0.3	g/cm ³ 1.554	g/cm ³ 1.541	0.71	0.72	0.71	0.72	2.555 1.955	4.9	0.0178	40.0	0.68	7.52	49.92°	44.92°
	4.76		1.531		0.73		0.73		2.634 2.034	6.7	0.0400	30.4	0.80	7.78	50.55	46.95
	19.1		1.544		0.72		0.71		2.733 2.133	6.6	0.0323	32.3	0.74	8.11	51.30	47.80
	38.1		1.536		0.73		0.73		3.054 2.454	8.3	-0.0435	29.6	0.63	9.18	53.47	50.47

b) モールの応力円

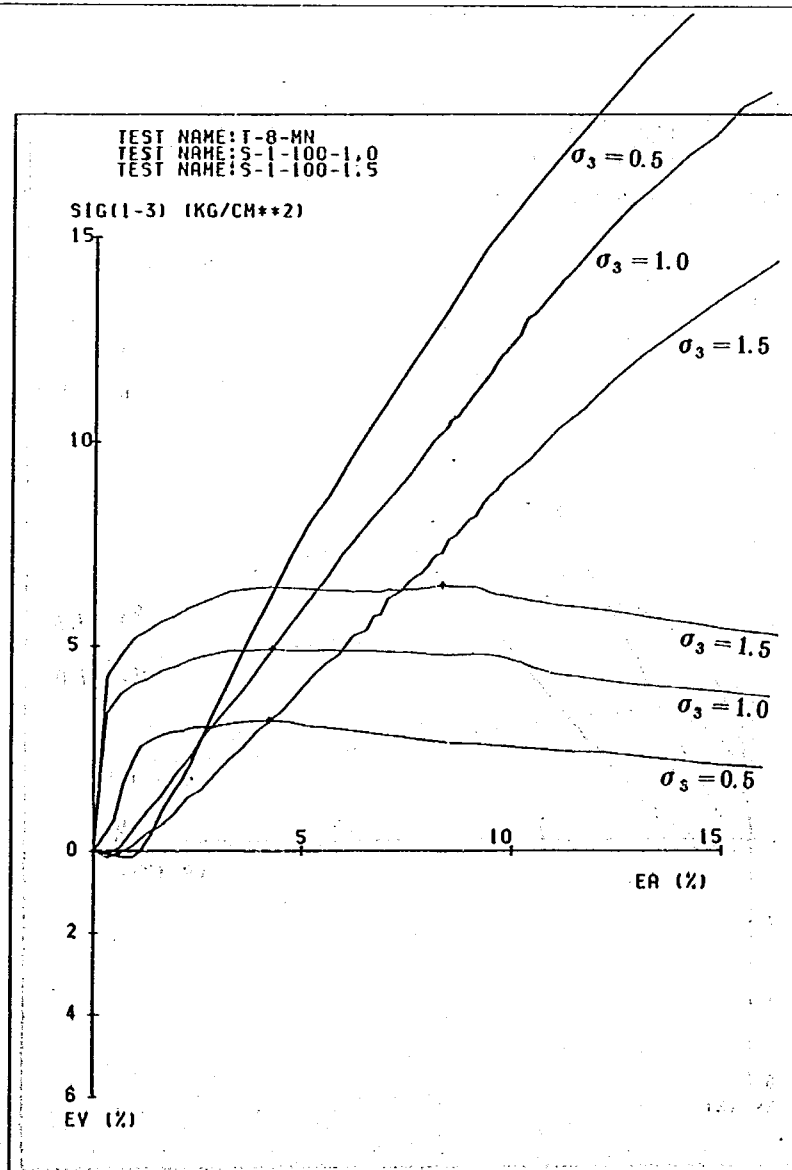
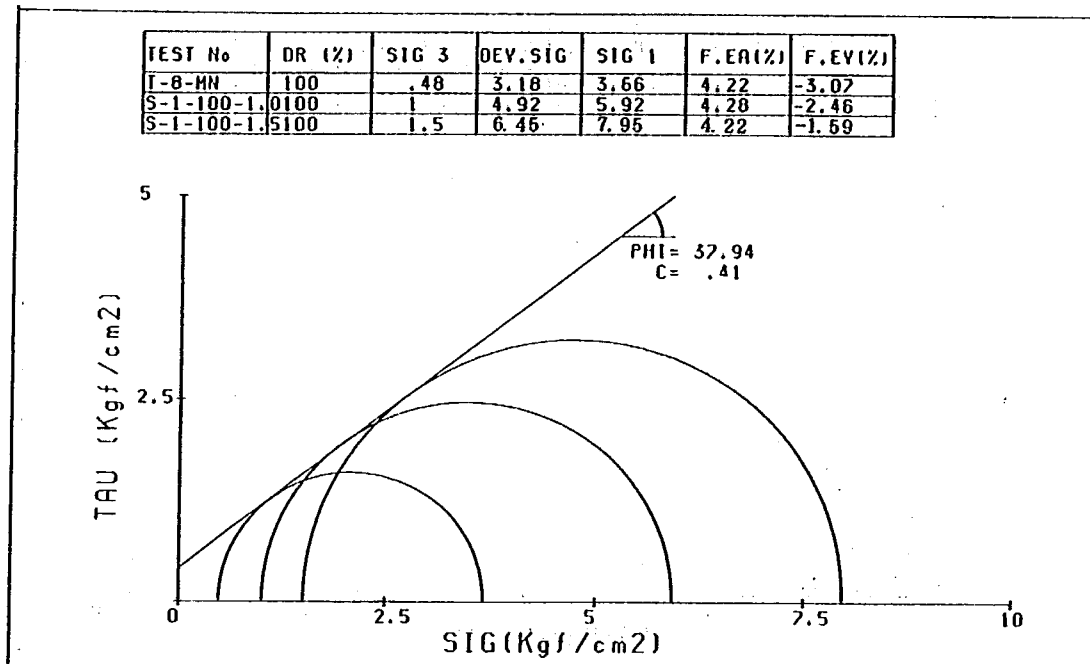


c) 応力・ひずみ曲線



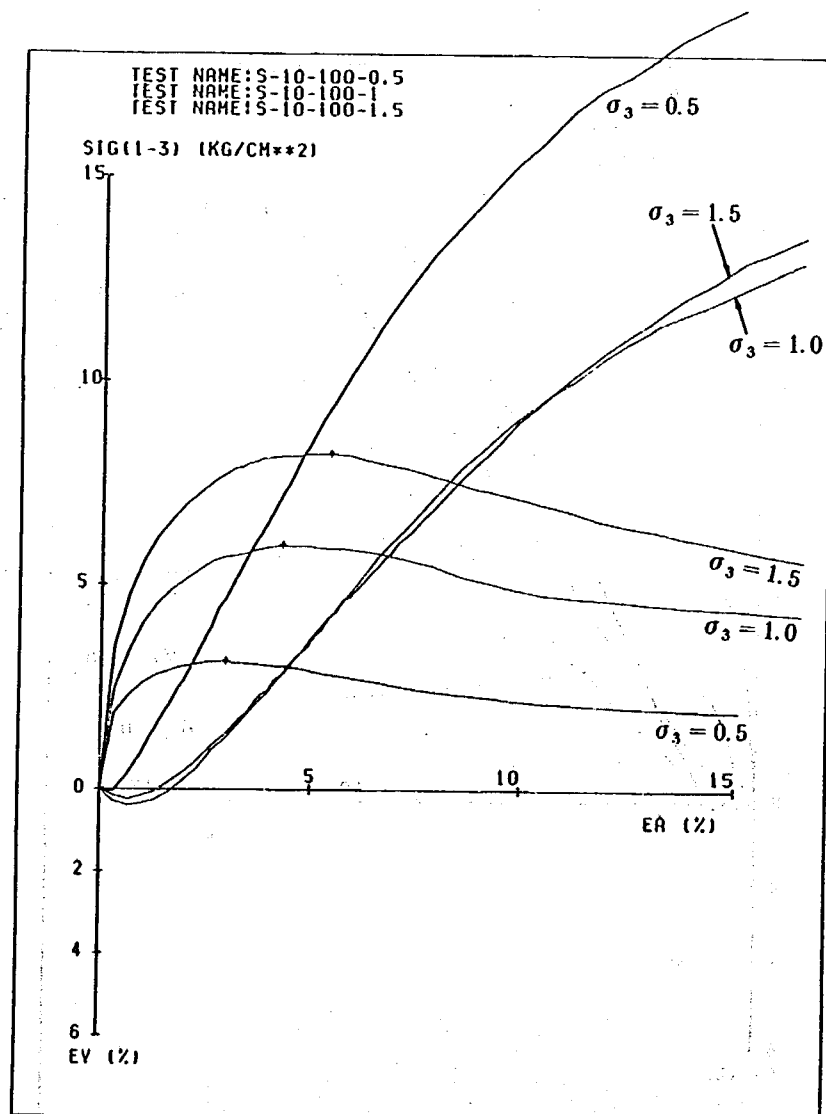
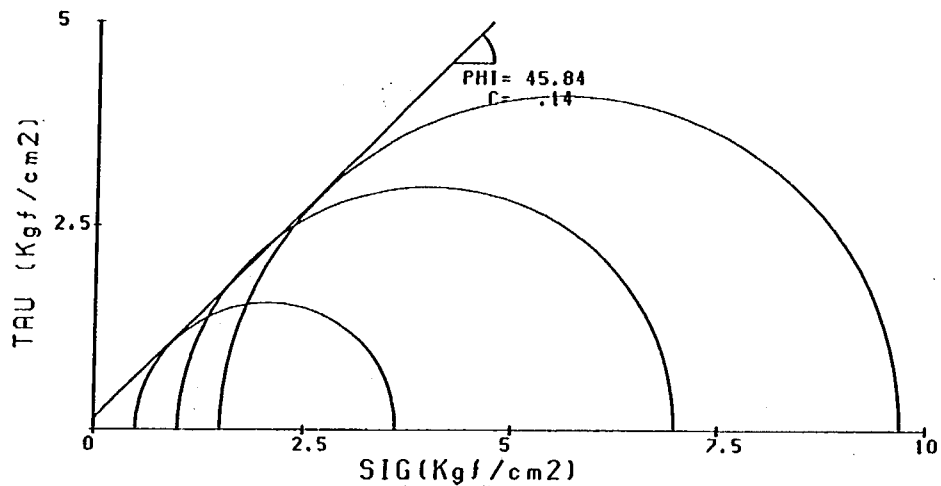
3. 粒度を変えた低拘束圧の三軸圧縮試験結果(1)

a) 均等係数1のモールの応力円および応力ひずみ曲線

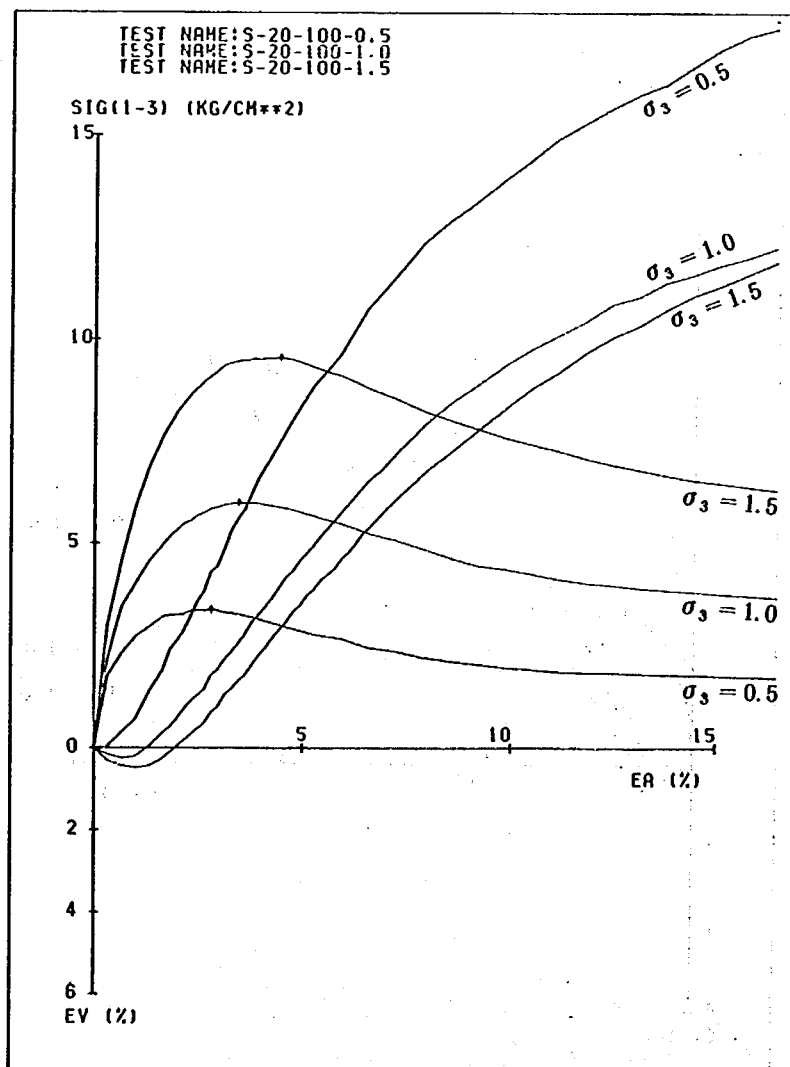
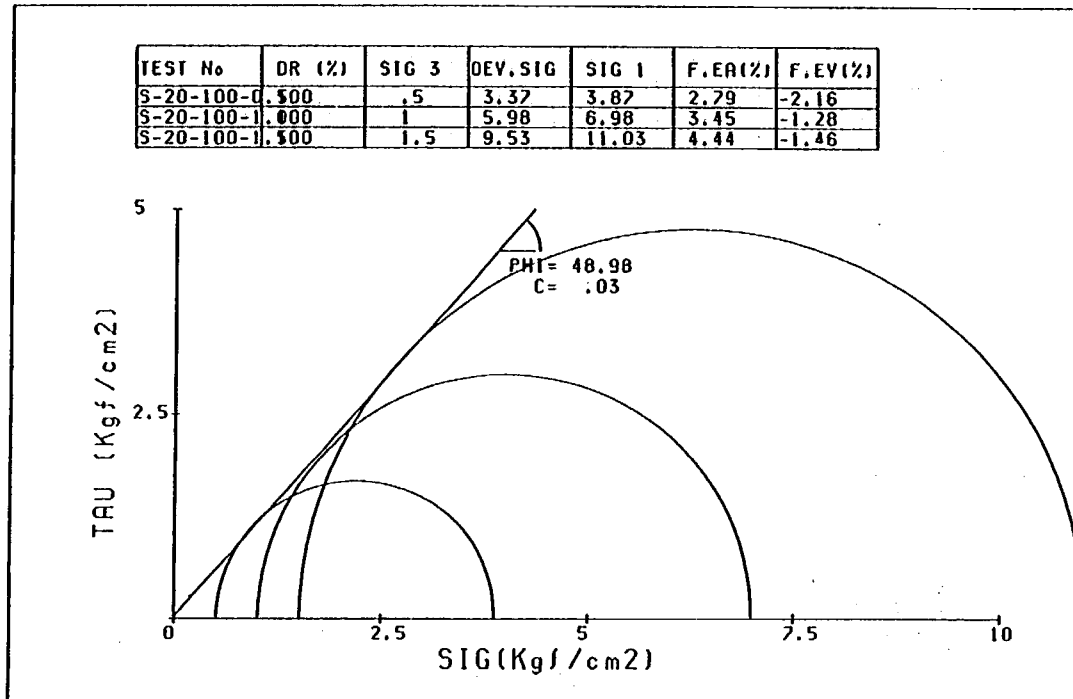


b) 均等係数 10 のモールの応力円および応力ひずみ曲線

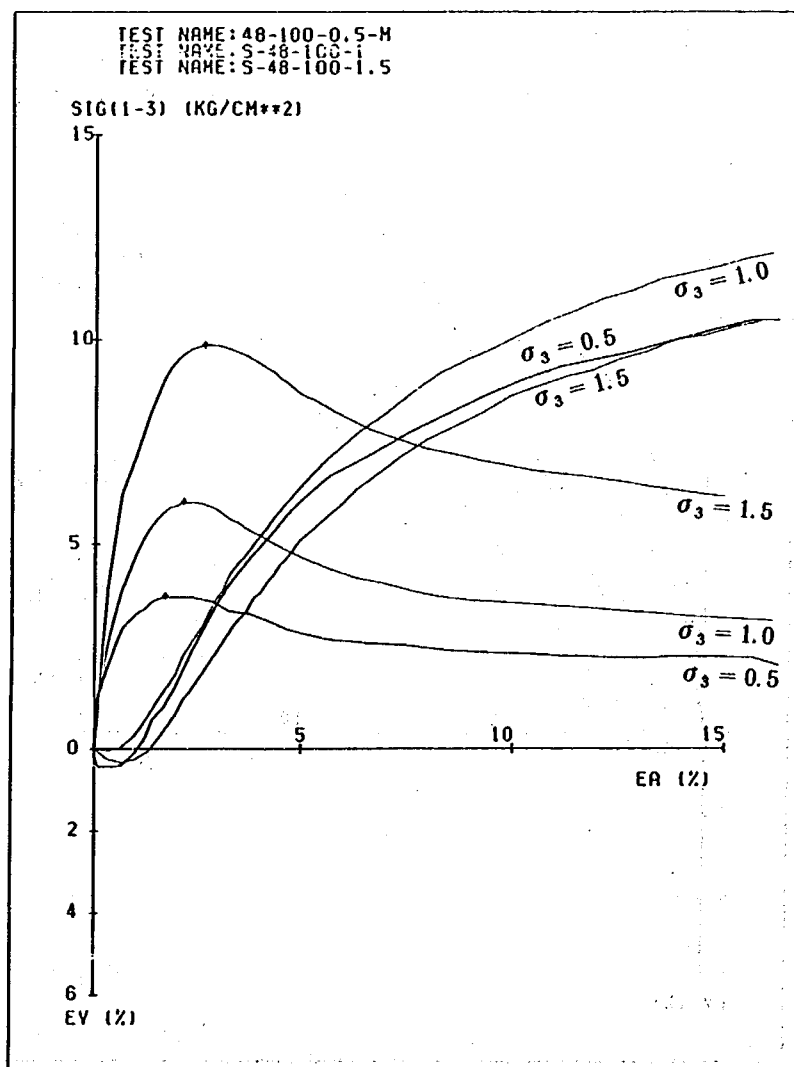
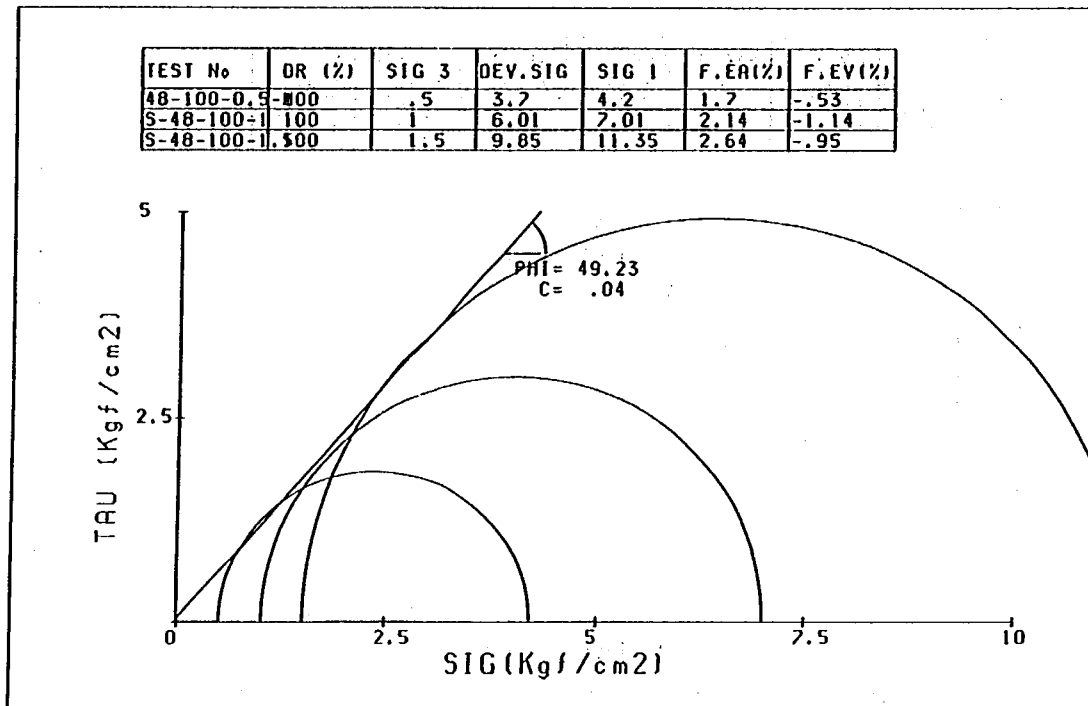
TEST No	DR (%)	SIG 3	DEV. SIG	SIG 1	F. EA (%)	F. EV (%)
S-10-100-0.500	.500	.5	3.12	3.62	2.95	-2.33
S-10-100-1.100	1.100	1.1	5.97	6.97	4.27	-1.4
S-10-100-1.500	1.500	1.5	8.2	9.7	5.43	-2.11



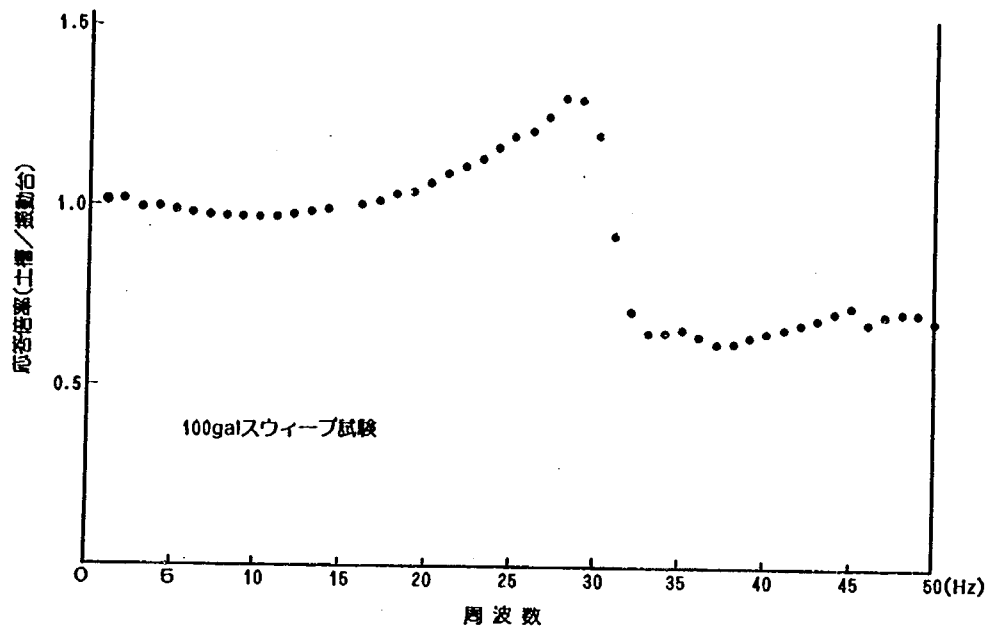
c) 均等係数 20 のモールの応力円および応力ひずみ曲線



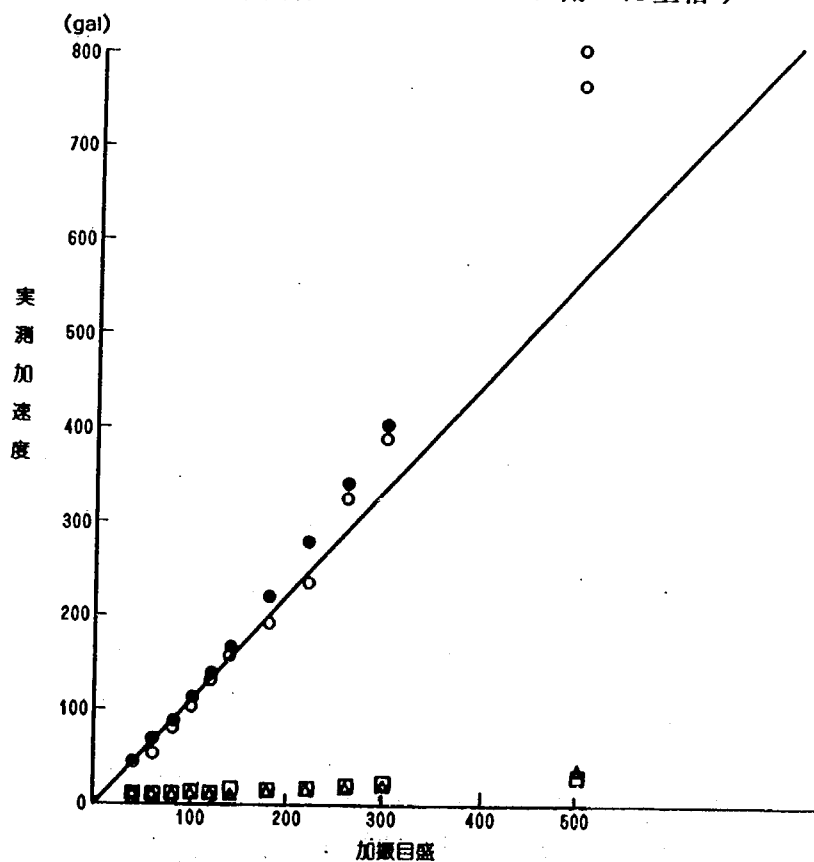
d) 均等係数 48 のモールの応力円および応力ひずみ曲線



4. 土槽の振動特性



a) 土槽の周波数応答倍率曲線 (CASE 2 - 6 に用いた土槽)



加振目盛		40	60	80	100	120	140	180	220	260	300	500	
土 槽	X	43gal	52	81	104	131	166	192	233	322	385	761	○
	Y	8	9	8	9	10	10	11	14	12	15	30	△
	Z	8	9	8	10	10	12	12	14	16	17	26	□
振動台	X	44	67	87	113	139	166	218	278	339	401	798	●

X : 振動方向

Y : 振動方向と直角成分

Z : 鉛直成分

b) 土槽の横振れの測定 (CASE 2 - 6 に用いた土槽)

ロックフィルダムの地震時表
層すべりに関する振動実験報
告

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第2424号
昭和 62 年 1 月 (1987)

キーワード：地震時表層すべり，ロック材料，振動実験

要 旨 本報告は，材料の最大粒径および粒度等がロックフィルダムの地震時表層すべりに与える影響を室内実験により解明しようとしたものである。
実験はロックフィルダム堤体全部をモデル化するのではなく，堤体表層の一部を切り出した要素モデルとして 4×4 m の振動台を用いて行った。
この結果，表層すべり加速度と最大粒径との相関は強く，均等係数の大小は破壊形態に影響すること，周波数依存性は加振時間が一定であれば表層すべり加速度に影響しないことなどがわかった。



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
フィルダム研究室
御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2424号 部

上記のとおり受領しました。

所 属（住所）

氏 名 印